

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Hodnocení kvality povrchu po vysokorychlostním
obrábění**

***Evaluation of Surface Quality after High Speed
Machining***

Student: Bc. Ladislav Vydra

Vedoucí diplomové práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ladislav Vydra**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Hodnocení kvality povrchu po vysokorychlostním obrábění**
Evaluation of Surface Quality after High Speed Machining

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky vysokorychlostního obrábění.
2. Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění.
3. Návrh a provedení experimentální části práce.
4. Měření charakteristik kvality povrchu.
5. Zhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] ERDL, BERT P. *High-speed machinig*. Deaborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.
- [5] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [6] ZELENÝ, J. Vysokorychlostní obrábění. *MM průmyslové spektrum*. 2000. ISSN 1212-2572.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

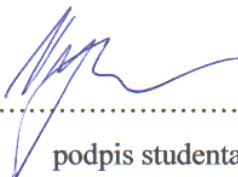


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě
23.5.2011

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě23.5.2011.....

.....

Ladislav Vydra

Adresa trvalého pobytu diplomanta: **Ladislav Vydra**

Unčovice 32

784 01 Litovel

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VYDRA, L. *Hodnocení kvality povrchu po vysokorychlostním obrábění: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 65 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá vlivem řezných parametrů na integritu povrchu při vysokých řezných rychlostech. V úvodní části práce je shrnuta problematika konvenčního a vysokorychlostního obrábění. Dále jsou uvedeny aspekty hodnocení kvality povrchu po obrábění. Praktická část je zaměřena na vhodnou volbu obráběcího stroje, nástrojů, obráběného materiálu a v neposlední řadě také volbu řezných podmínek. Následně jsou uvedeny naměřené výsledky a jejich vynesení do grafu. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VYDRA, L. *Evaluation of Surface Quality after High Speed Machining: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2011, 65 p. Thesis head: Petrů, J.

The aim of this thesis is to examine the influence of cutting parameters on the surface integrity at high-speed cutting. The introduction explores the issues of both conventional and high-speed cutting, including the assessment of the surface quality after conducting the cutting process. The section tackling the practical application focuses on the selection of the appropriate tools, cutting machine, material, and the importance of suitable conditions for cutting itself. Last but not least, the results obtained are presented in a survey diagram, and the conclusion summarizes the outcome of the measurements.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů:	8
Úvod	10
1 Úvod do problematiky vysokorychlostního obrábění	12
1.1 Moderní technologie obrábění	12
1.2 Pojem HSC a jeho definice	13
1.3 Aplikace vysokorychlostního obrábění	14
1.3.1 Typické aplikace	14
1.3.2 Výroba zápustek a forem	15
2 Porovnání řezných procesů konvenčních a při HSC	15
2.1 Řezný proces při konvenčním obrábění	17
2.2 Řezný proces při HSC	17
2.3 Tvorba třísky při konvenčním obrábění	18
2.4 Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění	21
2.4.1 Mechanika tvorby třísky v režimu HSC	22
2.4.2 Druhy třísek	23
2.5 Vliv řezných podmínek při procesu tvoření třísky	23
v režimu HSC	23
2.5.1 Vliv řezné rychlosti v_c	23
2.5.2 Vliv v_c na řezné síly	24
2.5.3 Vliv v_c na trvanlivost břitu nástroje	25
2.5.4 Velikost posuvu, hloubka řezu	26
3 Hodnocení kvality povrchu po obrábění	27
3.1 Drsnost povrchu	29
3.2 Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999)	30
4 Návrh a provedení experimentu	32
4.1 Obráběcí stroj	32
4.2 Použité nástroje	35

4.3	Obráběné materiály	38
4.4	Volba řezných parametrů.....	41
5	Měření charakteristik drsnosti povrchu.....	46
5.1	Použité zařízení pro měření drsnosti	46
5.2	Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou	48
5.3	Určování nejistot měření.....	49
5.4	Příklad výpočtu drsnosti s určením hrubé chyby a nejistoty měření.....	52
5.5	Zpracování naměřených hodnot	54
5.6	Shrnutí dosažených výsledků drsnosti povrchu	60
	Závěr.....	61
	Použitá literatura.....	62

Seznam použitých zkratek a symbolů:

A_5	- tažnost oceli	[%]
Ap_1	- maximální využitelná délka řezné části nástroje	[mm]
CAD	- Computer Aided Design (Počítačová podpora konstruování).....	[-]
CAM	- Computer Aided Manufacturing (řízení výroby počítačem)	[-]
D	- průměr stopky nástroje	[mm]
D_1	- řezný průměr nástroje	[mm]
F	- síla řezání	[N]
F_k	- síla řezání při konvenčním způsobu obrábění	[N]
F_m	- síla hybnosti	[N]
F_n	- normálová složka řezné síly	[N]
F_s	- smyková síla	[N]
F_t	- třecí složka síly řezání	[N]
HB	- tvrdost dle Brinella	[-]
HSC	- High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)	[-]
K	- součinitel přechování třísky	[-]
L	- celková délka nástroje	[mm]
LS	- použitelná délka stopky nástroje	[mm]
N	- přitlačná síla	[N]
PPD	- primární plastická deformace	[-]
PVD	- vícevrstvý povlak	[-]
R_a	- průměrná aritmetická úchylka	[μm]
R_p	- největší výška profilu od střední čáry profile	[μm]
R_t	- celková výška profilu	[μm]
R_z	- největší výška profilu	[μm]
S, S_1	- průřez třísky	[mm^2]
SPD	- sekundární plastická deformace	[-]
T	- třecí síla	[N]
TiC	- titan karbid	[-]
TiCN	- titan karbon nitrid	[-]
TiN	- titan nitrid	[-]

TPD	- terciální plastická deformace	[-]
$Z(x)$	- hodnota pořadnic	[-]
Z_p	- nejvyšší výstupek profilu	[μm]
Z_v	- nejnižší prohlubeň profilu	[μm]
a, a_1	- tloušťka třísky	[mm]
a_p	- hloubka řezu	[mm]
k_n	- konstanta	[-]
l, l_1	- délka třísky	[mm]
n	- otáčky	[min^{-1}]
r_{tip}	- poloměr měřicího hrotu	[mm]
r_{tip}	- poloměr měřicího hrotu	[mm]
$s(x)$	- směrodatná odchylka	[mm]
u_A	- standardní nejistota typu A	[μm]
u_B	- standardní nejistota typu B	[μm]
u_C	- kombinovaná standardní nejistota	[μm]
v_c	- rychlost řezání	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_e	- výsledná rychlost řezání	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	- rychlost posuvu	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
$v_{\theta t}$	- v_c , při které se teplota v oblasti PPD již přiblíží θ tavení mat.	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_t	- rychlost odcházející třísky	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
z	- počet zubů frézy	[-]
σ_{Pt}	- pevnost v tahu	[MPa]
Φ	- úhel roviny stříhu	[$^\circ$]
Φ_1	- úhel střižné roviny	[$^\circ$]
Φ_M	- úhel kluzných rovin	[$^\circ$]
Φ_N	- úhel kluzných rovin	[$^\circ$]
ψ	- rozdíl mezi úhly Φ_1 a Φ	[$^\circ$]

Úvod

Samotnou koncepci obrábění vysokými řeznými rychlostmi začal uplatňovat již pan Dr. Carl J. Salamon a to sérií experimentů, jenž byly prováděny v letech 1924 až 1931 a posléze vyústily v německý patent, který spočíval v sérii křivek popisující závislost teploty řezání na řezné rychlosti. Pomocí experimentů byly obráběny neželezné kovy, jako jsou hliník, měď, resp. bronz. Salamon dosáhl při frézování frézami velkých průměrů se šikmými zuby řezných rychlostí až $16\,500\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Dále předpokládal, že řezná teplota dosahuje maxima při určité řezné rychlosti a při jejím dalším zvyšování již teplota řezání poměrně rychle klesá. Pokles byl zdůvodňován tím, že s řeznou rychlostí se zmenšuje primární plastická deformace, jelikož stupeň plasticity materiálu je závislý na rychlosti deformace, a proto s rostoucí řeznou rychlostí se materiál stává méně plastický. Rovněž se domníval, že tvar křivky závisí na druhu obráběného materiálu.

Cílem bylo překonat hranici obecně nazvanou kritická řezná rychlost, které odpovídá kritická řezná teplota, při níž fréza není schopná odolávat vysoké teplotě a silám. Podle předpokladů mělo dojít za touto hranicí ke snížení teploty až na takovou mez, jaká by byla při běžné řezné rychlosti. Tak může řezný proces probíhat opět normálně při stejných teplotách řezání, ale s tím rozdílem, že by se pohyboval v oblasti obrábění vysokými řeznými rychlostmi.

V dnešní době se dá vycházet ze zjištění, že na základě hospodářských důvodů a výsledků, se bude v zemích EU vysokorychlostním obrábění používat stále častěji. Rozsah vzdělávání a výuky by měl tento vývoj kopírovat a doprovázet, aby docházelo ke vzdělávání kvalifikovaných odborníků, speciálně pro tuto specifickou a náročnou výrobní technologii.

Rozhodujícím faktorem k zavádění produktivních metod obrábění je změna složení sortimentu obrobků a rostoucí tlak na kvalitu a ekonomiku výroby. Souvisí to zejména s neustále rostoucím podílem výroby forem, zápusťek, tedy obrobků, které v sobě zahrnují velmi vysokou mnohotvárnost různých tvarů, ploch a velmi vysoké nároky na jakost obrábění. Metodami klasického obrábění jsou tyto obrobky velice obtížné a nákladně vyrobitelné. To je ovšem v příkrém rozporu s požadavky trhu, který naopak vyžaduje velkou flexibilitu a nízkonákladovost výroby.

Z toho důvodu se v této souvislosti v obráběčské praxi stále častěji objevují metody obrábění, jako jsou HSC (High Speed Cutting) resp. HSM (High Speed Machining) a další.

Cíl samotné práce je zhodnotit vliv navržených řezných parametrů na výslednou drsnost povrchu. Teoretická část práce se zabývá porovnáním konvenčního a vysokorychlostního obrábění, vlivu řezných podmínek na integritu povrchu. Náplní praktické části je vhodná volba obráběcího stroje, řezných nástrojů i obráběného materiálu. V závěru práce je graficky znázorněna závislost řezné rychlosti na hodnotách drsnosti povrchu a shrnuty výsledky práce.

1 Úvod do problematiky vysokorychlostního obrábění

1.1 Moderní technologie obrábění

Zejména s vývojem nových výrobků, a to nejen pouze strojírenských, prodělává v poslední době strojírenská výroba na celém světě velmi zásadní přeměny. Je to v podstatě způsobeno vývojovými trendy u nových výrobků, které je možno shrnout do následujících bodů: [5]

- rostoucí užitná hodnota výrobku jako celku a tím i jeho složitosti,
- snižování hmotnosti a uživatelské energetické náročnosti výrobku,
- obecně vyšší jakost a spolehlivost výrobku,
- tlak trhu na rychlou modernizaci výrobku, tj. zkracování životního cyklu,
- relativní snižování ceny v důsledku konkurenčního boj.

Zde uvedené vývojové trendy výrobků zásadně ovlivňují většinu strukturních částí výroby a vyžadují jejich změny, například v technologii obrábění:

- nové řezné materiály a nástroje,
- nové postupy obrábění: obrábění „na jedno upnutí“,
- nové způsoby obrábění s využitím NC řízení obráběcích strojů jako jsou rotační frézování, planetové frézování, rotační protahování, nové metody vrtání a výroby závitů,
- nové produktivní metody obrábění jako jsou vysokorychlostní, neboli výkonné obrábění (HSC nebo HSM), obrábění již zušlechtěného materiálu obrobku (obrábění zatvrda), bez chladících a mazacích kapalin (obrábění zasucha), obrábění s minimálním množstvím chladících a mazacích kapalin.

1.2 Pojem HSC a jeho definice

Mimo vlastního vysokorychlostního obrábění zahrnuje HSC technologie i tzv. suché a tvrdé obrábění. Suché obrábění sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití redukčních kapalin a redukci na jejich filtraci a recyklování. Načež tvrdé obrábění souvisí s obráběním velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu, náhradou za dříve užívanou technologii broušení. Dosud se zatím nikomu nepodařilo přiměřeně pojmenovat tuto sdruženou technologii přesně určující definicí, jež by popsala a vystihla okolnosti, mechanismus a způsob vlastního obrábění, a nad kterou by panovala všeobecná shoda.

Termín obrábění vysokými řeznými rychlostmi nastiňuje pouze část celé pravdy o této technologii, proto již v úvodu je nutno připomenout, že se nejedná jen o zmíněnou extrémně vysokou řeznou rychlost, jak by se mohlo zdát, při prvním pohledu na věc, nýbrž také o vysoké rychlosti posuvů. Jedná se o velmi výkonné obrábění, při kterém dosahujeme velkých objemů obrobeneho materiálu za časovou jednotku tzv. úběrů.

Vysoká řezná rychlost je velice relativní pojem. Nelze říct, že konvenční obrábění přechází do oblasti vysokorychlostního obrábění od určité hodnoty řezné rychlosti, bez ohledu na ostatní podmínky, které vytváří řezný proces. Těmito podmínkami je myšlen jednak způsob obrábění a především druh obráběného materiálu, který je zejména tím rozhodujícím faktorem, určujícím příslušnou velikost řezné rychlosti.

Z těchto důvodů relativního posuzování HS obrábění a dále také proto, že řezná rychlost výrazně ovlivňuje to, jestli obráběný materiál bude tvořit plynulou nebo článkovitou třísku, je další možností definovat daný princip obrábění spíše z hlediska procesu tvoření třísky. [5]

Z praktického hlediska se i nadále dává přednost definování vysoké řezné rychlosti kvantitativně ve smyslu jejich určitých rozsahů.

1.3 Aplikace vysokorychlostního obrábění

1.3.1 Typické aplikace

První skupinou je obrábění s vysokým podílem hrubování při použití výkonných vřetenových jednotek. Jedním z příkladů je výroba integrálních dílů pro letecký průmysl, nebo sériová výroba v automobilovém průmyslu. HSC metodami se vyrábějí i střední série komponentu, např. skříně převodovek, pumpy, díly brzd, hlavy válců apod. Jako materiál se zde používají převážně slitiny hliníku.

Do další skupiny aplikací HSC technologií patří součásti z křehkých materiálů nebo součásti s tenkými stěnami, náchylnými na deformace. Tyto materiály nelze konvenčními metodami úspěšně opracovat. Při obrábění vysokými rychlostmi existuje jen malá pravděpodobnost deformace obrobku, jelikož vznikají pouze malé síly působící na obrobek.

Součástí třetí skupiny jsou výrobci zápustek, forem, lisovacích nástrojů a elektrod. Zavedením HSC metod zde byly vytvořeny předpoklady pro optimalizaci celého výrobního procesu. Přínosem je kromě zkrácení výrobního času rovněž výrazné zkrácení výrobního řetězce, snížení rozpracovanosti výroby, nahrazení některých nekonvenčních metod obrábění. To vše je umožněno díky značným zlepšením přesnosti a kvality povrchu. Převážně odpadá nutnost následného ručního dokončování povrchu formy. Typickými materiály je zde ocel, kalená ocel a měď.

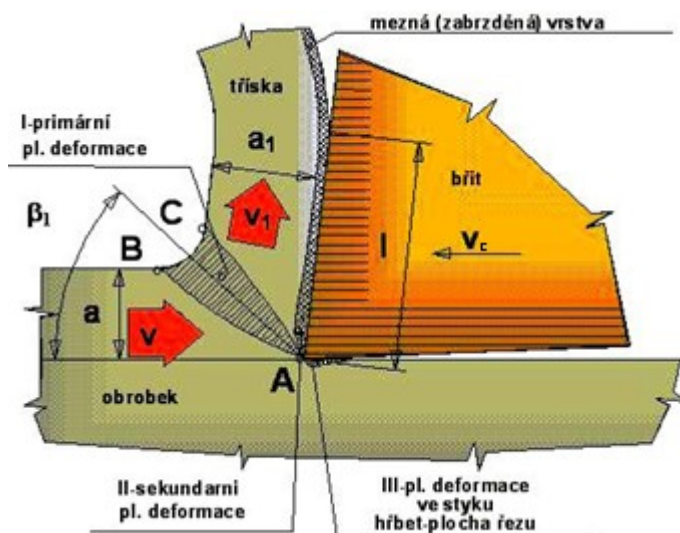
Čtvrtou typickou aplikací je obrábění součástí z materiálů citlivých na teplo vzniklé v průběhu řezného procesu. Opět se zde využívá efektu vysokorychlostního obrábění, avšak tentokrát efektu menších tepelných toků do materiálu obrobku z procesu řezání.

1.3.2 Výroba zápusťek a forem

Důvody, které vedou k nasazení aplikace HSC právě v této oblasti jsou plně patrné při pohledu na dosavadní způsob výroby a z něj plynoucí možnosti zlepšení. Jedná se zejména o zvýšenou přesnost, integritu povrchu a dokonalé odfrézování požadovaného materiálu obrobku, jenž má za důsledek redukci nebo úplné odstranění dokončovací fáze opracování, jako jsou elektrojiskrové obrábění, dobrušování, leštění či ruční dokončování. Znamená to, že k obrobení celého obrobku je zapotřebí pouze několika frézovacích nástrojů pro hrubování a při dokončování převládá snaha o použití pouze nástroje jedné velikosti, z čehož plyne výrazná úspora nástrojů. Další výhodou nasazení HSC je zkrácení průběžných časů obrábění a tím snížení finančních nákladů.

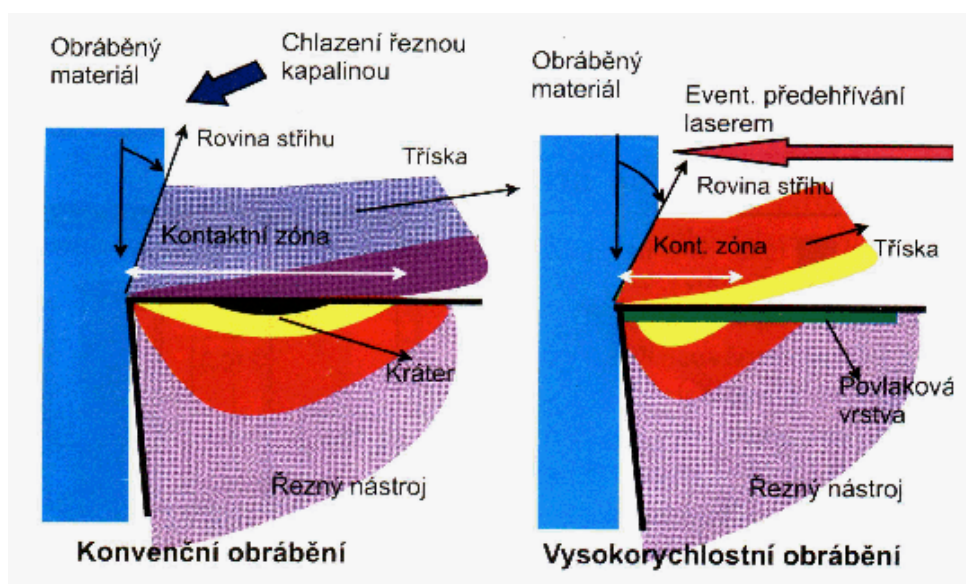
2 Porovnání řezných procesů konvenčních a při HSC

Obecně platí, že efektivní řezání kovů nastává, pouze když si řezný materiál při teplotě a v prostředí řezného procesu udrží výraznou převahu tvrdosti (o několik stupňů vyšší) oproti obráběnému materiálu.



Obr. 1 Oblasti plastické deformace [5]

Břit nástroje se při obrábění pohybuje vůči obrobku řeznou rychlostí v_c a působením řezné síly F odřezává z obrobku určitou vrstvu o tloušťce a , která závisí na posuvu. K deformacím, které způsobují přetvoření odřezávané vrstvy v třísku, dochází v oblasti před břitěm nástroje. Zejména v této oblasti probíhá primární plastická deformace (PPD), a to v celém průřezu odřezávané vrstvy. Významný vliv na vlastnosti PPD má řezná rychlost. Další oblast, kde dochází k plastické deformaci, je oblast sekundární plastické deformace (SPD). Jedná se o oblast třísky v těsné blízkosti dotykové plochy mezi třískou a čelem břitu, ve které vzniká intenzivní tření. Obě tyto oblasti plastické deformace mají největší vliv na proces řezání, a tím pádem je důležité se ve srovnání obou řezných procesů zaměřit právě na ně.



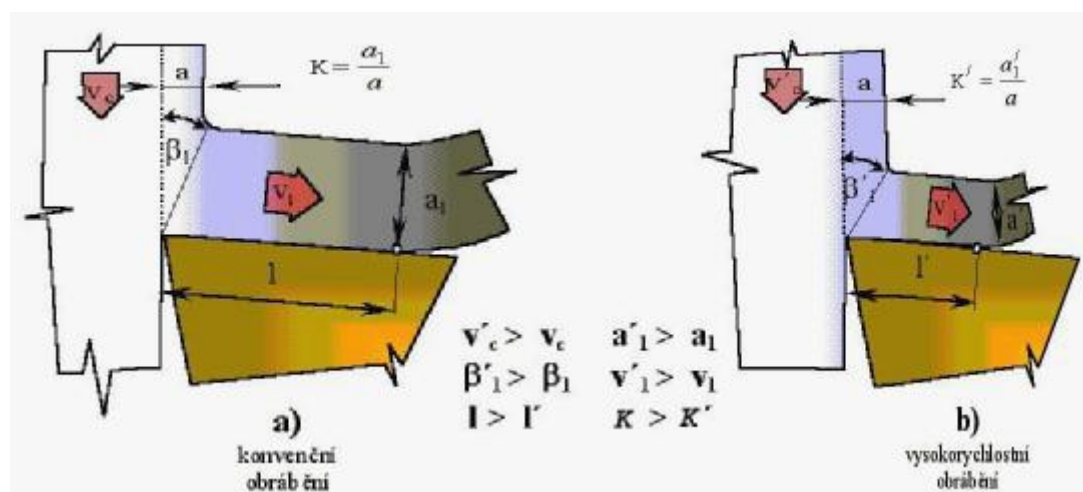
Obr. 2 Porovnání konvenčního a vysokorychlostního řezného procesu[5]

Se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla řezného procesu, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí smyku třísky a intenzitou tření třísky o břit. Plastickou deformací třísky v rovině smyku se rázem skokově změní její teplota, která dále roste třením třísky o čelo břitu.[5]

2.1 Řezný proces při konvenčním obrábění

Při konvenčním způsobu obrábění, prochází odřezávaný materiál obrobku oblastí primární plastické deformace a výrazně se plasticky deformuje, to má za následek zpevnění materiálu vnikající třísky oproti původnímu materiálu obrobku. Tímto způsobem zpevněná tříska má až 1,5 krát vyšší tvrdost a klade větší řezný odpor.

Tloušťku třísky zvyšuje malý úhel smykové roviny, který je vyvolaný velkým odporem zpevněné třísky. S rostoucí tloušťkou třísky roste i koeficient přechování K . S narůstající hodnotou K , je tříska více deformovaná a to má za následek větší řezné rychlosti. V oblasti sekundární plastické deformace, smykové napětí přesahuje mez kluzu ve smyku již zpevněného materiálu třísky a dochází k další výrazné plastické deformaci.

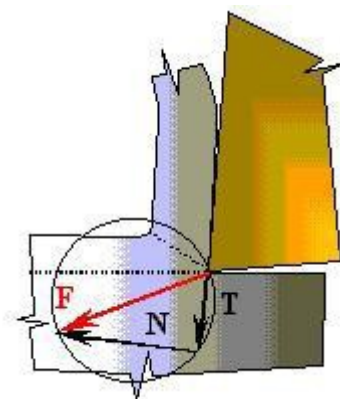


Obr. 3 Srovnání poměrů v místě řezu pro konvenční a HSC obrábění [5]

2.2 Řezný proces při HSC

Během zvyšování řezné rychlosti do oblasti HSC obrábění dochází k výrazně rozdílným pochodům, než u konvenčního obrábění. Teplota třísky se v podmínkách HSC přiblíží tavné teplotě obráběného materiálu a během určité řezné rychlosti dojde k náhlé změně řady metalurgických i mechanických vlastností třísky.

Tříska zčervená, i kalená ocelová tříska změkne a zmenší svoji přitlačnou sílu (N) na čelo břitu. Celkový řezný odpor i třecí síla (T) klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, zvýší se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny a omezí se sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně.



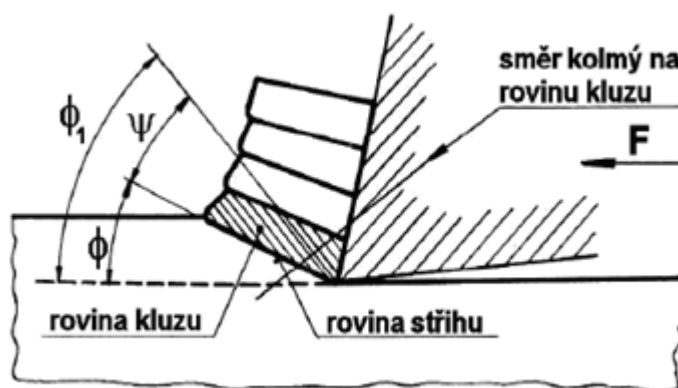
Obr. 4 Rozklad řezné síly na složku normálovou a třecí [5]

2.3 Tvorba třísky při konvenčním obrábění

U krystalických a nekrystalických látek je mechanismus vzniku a oddělování třísky různý. Ve strojírenské praxi jsou nejčastěji používané krystalické materiály. Experimentální a teoretické studie těchto materiálů se provádějí především pro případ ortogonálního řezání.

Důsledkem tlaku nástroje se nejdříve materiál na čelní ploše břitu pěchuje. Účinkem řezné síly vznikají v materiálu značná napětí, která překonávají vnitřní síly soudržnosti a odporu materiálu, až se před břitkem vytvoří trhlinka ve směru působení řezné síly. Stlačené částičky třísky se při dalším pohybu nástroje na čelní ploše nadzvednou a klouzají po čelní ploše břitu. Čelem nástroje jsou odráženy a odváděny jako tříska.

Vnikání klínového břitu nástroje do materiálu a tvoření třísky vyžaduje řeznou sílu, jejíž velikost závisí na obrobiteľnosti (pevnosti a tvrdosti) obrobku, velikosti průřezu třísky, tvaru břitu a jeho nastavení vůči obrobku. Vlastnosti materiálu ovlivňují tvar oddělované třísky. [12]



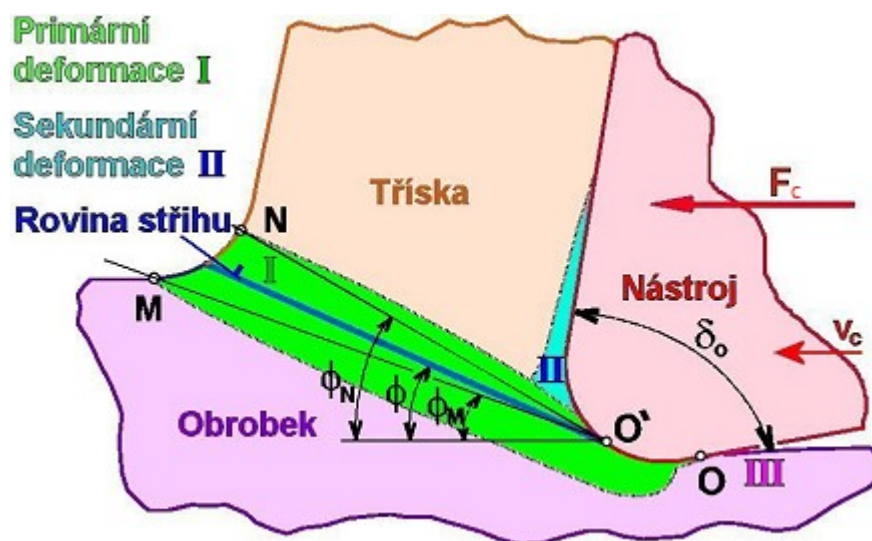
Obr. 5 Vznik třísky při konvenčním způsobu obrábění [7]

Při dalším pohybu nástroje narůstá napětí uvnitř materiálu, až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu ϕ .

Rozdíl mezi úhly ϕ_1 a ϕ se pohybuje v rozmezí $\psi = (0 \div 30)^\circ$, nízké hodnoty úhlu ψ vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty naopak materiály křehké (např. šedé litiny).

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné a plastické deformace v těchto oblastech: [7]

- před břitem nástroje, v oblasti primární plastické deformace, která se značí *I* a vymezuje body OMNO',
- v povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace, která je označena *II*,
- v povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciální plastické deformace *III*.



Obr. 6 Deformační oblasti při tvorbě třísky [3]

Oblast primární plastické deformace:

- je tvořena postupným vnikáním břitu nože do obráběného materiálu, při kterém vznikají nejdříve pružné, později trvalé plastické deformace částic oddělovaného materiálu. Oblast PPD přímo ovlivňuje velikost pěchování třísky.

Oblast sekundární plastické deformace:

- v povrchových vrstvách plochy styku třísky s čelem nástroje. Oblast SPD ovlivňuje velikost nárůstu.

Oblast terciální plastické deformace:

- v místě smyku roviny hřbetu nástroje a obrobené plochy. Oblast TPD ovlivňuje povrchové vrstvy.

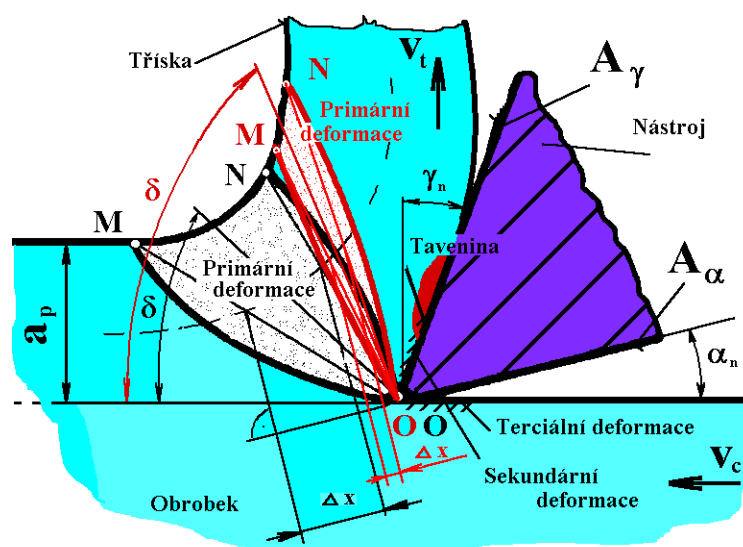
Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- oddělení třísky od obrobku,
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory,
- tepelné zatížení nástroje,
- opotřebení nástroje,
- změnu textury materiálu i v povrchové vrstvě obrobené plochy,
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy,
- pěchování třísky (průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám).

2.4 Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění

Vysokorychlostní obrábění, které je realizované zvláště výkonnými, mimořádně tvrdými a tepelně odolnými řeznými nástroji, probíhá při teplotě třísky blízké tavné teplotě obráběného materiálu. [2]

Vlivem změny řezné rychlosti dochází k náhlé změně řady metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky. Tříska sníží svoji přitlačnou sílu na čelo nástroje. Tento děj nastane také v případě kalené ocelové třísky, která rovněž změkne. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez odcházející třísky a zvýší se rychlost v_t jejího odchodu z kontaktní zóny.



Obr. 7 Tvorba třísky u „klasické“ a „HSC technologie“ [2]

2.4.1 Mechanika tvorby třísky v režimu HSC

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik hlavně dvou druhů třísek, a to třísky elementární a soudržné. Soudržnou třísku dělíme podle rozložení plastické deformace na článkovitou nebo plynulou. Plynulá tříska se tvoří u kovů a slitin s krychlovou, prostorově nebo plošně středěnou krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí (patří mezi ně např. slitiny hliníku nebo oceli s nízkým obsahem uhlíku).

Zatím co tvorba článkovité souvislé třísky je pozorována u obrábění kovů s hexagonální těsnou krystalovou mřížkou, které jsou charakteristické nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí. Do této kategorie jsou zahrnuty zejména materiály, jakými jsou titanové a niklové slitiny.

Druh vzniklé třísky pro určitý obráběný materiál závisí rovněž na velikosti řezné rychlosti. Z tohoto důvodu je u vysokorychlostního obrábění pozorován vznik soudržné plynulé třísky, soudržné článkovité třísky i třísky elementární. Při nízkých řezných rychlostech se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska a od určité řezné rychlosti se začne vytvářet soudržná článkovitá tříska. Ta se mění na třísku elementární s narůstající řeznou rychlostí.

2.4.2 Druhy třísek

Tříska plynulá:

- z pravidla se tvoří při obrábění měkkého a houževnatého materiálu při štíhlém tvaru průřezu třísky, při velké řezné rychlosti a při velkých kladných úhlech čela. Plynulá tříska není žádoucí, jelikož zaujímá velký prostor a je nebezpečná na obsluhu. Tato tříska se tvoří u materiálů dobře plasticky deformovatelných. Plynulé třísky, které mohou způsobovat pracovní úrazy, značně omezovat pracovní výkon a poškozovat povrch obrobku i nástroje.

Tříska článkovitá:

- vytváří se při obrábění tvrdých a tvárných materiálů. Při jejich tvorbě dochází k odstřížení jednotlivých částic, dobře patrných na vnějším povrchu třísky. Ta odchází po čele v kratších celcích ve tvaru různě tvarovaných pásků. Tato tříska je z hlediska obrábění nejpříznivější.

Tříska drobivá:

- vzniká při obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Vytváří se vylamováním jednotlivých elementů bez vzájemné souvislosti. Má tvar šupin, úlomků a zrneček. Drodivé třísky se u velké části materiálů dají vytvořit úpravou tvaru řezného nástroje (lamače za břitem), ale automaticky vznikají u křehkých materiálů. Spadá sem litina, automatová ocel, mosaz, hliník a další. Výhodné jsou hlavně z hlediska bezpečnosti a objemu odpadu.

2.5 Vliv řezných podmínek při procesu tvoření třísky

v režimu HSC

2.5.1 Vliv řezné rychlosti v_c

S narůstající řeznou rychlostí se zužuje oblast PPD a úhly β_0 a β_1 rostou. V oblasti HS obrábění se PPD soustřeďuje do úzkého smykového pásu v okolí smykové roviny,

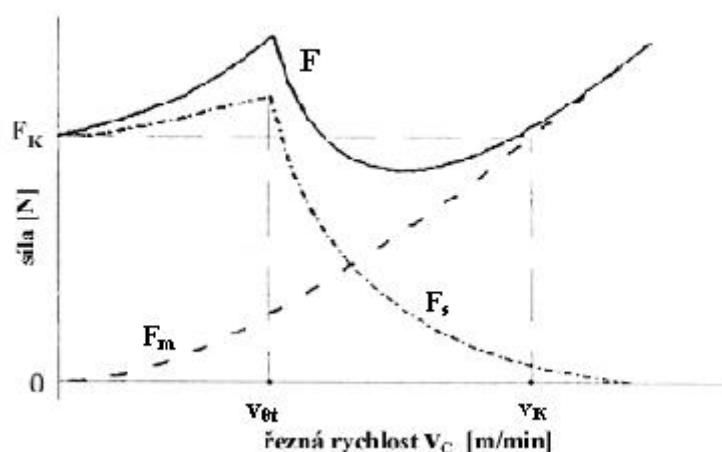
v důsledku omezené rychlosti šíření kluzu v polykrystalech. Zmenšování intenzity plastické deformace způsobuje rostoucí řezná rychlost. V režimu HSC téměř nedochází k plastické deformaci třísky.

2.5.2 Vliv v_c na řezné síly

S rostoucí řeznou rychlostí se zmenšuje řezná síla až do dosažení minima, při řezné rychlosti charakteristické pro daný materiál. Následně má řezná síla tendenci k růstu s rostoucí řeznou rychlostí.

Z obr. 8 je patrné, že do řezné rychlosti v_{ot} převládá vliv složky F_s , v rozmezí rychlosti v_{ot} a v_k začíná dominovat složka F_m a při řezných rychlostech větších než v_k ovlivňuje výslednou sílu F již jen složka F_m . Z čehož vyplývá, že v praxi by neměly řezné rychlosti (z hlediska řezných sil) přesáhnout hodnotu odpovídající v_k , neboť při řezné rychlosti v_k dosahuje řezná síla „konvenční“ velikosti, čímž by HSC ztratilo svoji výhodu spočívající ve snižování řezných sil a náklady vynaložené na dosažení takto vysokých řezných rychlostí by způsobily ekonomickou ztrátu.

Snížení řezné síly, které je pozorované při obrábění různých materiálů nesnižuje nároky na výkon obráběcích strojů. Mechanická práce je součinem řezné rychlosti a řezné síly. Potřebný výkon stroje stále roste, jelikož pokles řezných sil je v porovnání s růstem řezné rychlosti zanedbatelný. Snížení řezných sil se rovněž s výhodou používá při obrábění tenkostěnných a málo tuhých částí obrobků.



Obr. 8 Teoretické chování výsledné řezné síly a jejích složek při vysokých řezných rychlostech [7]

F – výsledná řezná síla, F_m – síla hybnosti, F_s – smyková síla, F_k – řezná síla při konvenčním způsobu obrábění, $v_k - v_c$ při které F opět stoupne na „konvenční“ velikost, $v_{0t} - v_c$ při které se teplota v oblasti PPD již přiblíží θ tavení obráběného materiálu.

2.5.3 Vliv v_c na trvanlivost břitu nástroje

Nárůstem řezné rychlosti se zvyšuje střední hodnota řezání k teplotě tavení obráběného materiálu. Teplota tavení obráběného materiálu představuje maximální teplotu řezání pro daný materiál. Z důvodu závislosti intenzity opotřebení břitu nástroje na teplotě řezání, tvoří opotřebení restriktivní faktor pro zvyšování řezné rychlosti. Výjimku představuje obrábění hliníku, jelikož jeho teplota tavení je pouze 600-660°C. Důsledek toho je doposud obrábění hliníku technologií HSC nejrozšířenější.

Trvanlivost břitu je při obrábění vysokými řeznými rychlostmi ovlivněna dvěma různými druhy otěru. Patří mezi ně chemické rozpouštění a difúze. Nejdůležitější příčinou opotřebení je chemické rozpouštění. V podstatě se řezný materiál rozpouští v tříse. Druhým mechanismem je otěr limitovanou difúzí. Vlivem zvyšující se řezné rychlosti dosáhne teplota řezání takové úrovně, při které se materiál třísky navažuje na čelo břitu.

Následně vzniká vrstva materiálu, která se postupně nasycuje difundujícími prvky z řezného materiálu. Toto nasycení má za následek snížení koncentračního spádu mezi břittem a navařenou vrstvou a tím pádem intenzita opotřebení břitu se snižuje. Jelikož se však difuzivita exponenciálně zvyšuje s narůstající teplotou, vytváří případné zvýšené řezné rychlosti nad bod minimálního opotřebení již rychlý nárůst intenzity opotřebení.

2.5.4 Velikost posuvu, hloubka řezu

U HS obrábění mají hodnoty velikosti posuvu a hloubky řezu stejný vliv na jevy obrábění, jako při konvenčním obrábění. Ovšem jejich hodnoty jsou u HS obrábění velice závislé na mnoha faktorech a jejich hodnoty se musí vždy přesně dodržet v určitém rozmezí. Zejména při obrábění tvarových ploch se musí dodržet vhodná strategie úběru materiálu obrobku. V koutech a ostrých přechodech se může velikost hloubky řezu značně měnit.

Vliv hloubky řezu a velikosti posuvu na některé jevy: [7]

- s rostoucí velikostí posuvu klesá součinitel přechování, rostou řezné síly, roste střední teplota řezání a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou v_c),
- s rostoucí velikostí hloubky řezu klesá měrný řezný odpor, klesá součinitel přechování, roste střední teplota řezání, rostou řezné síly a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou v_c). Roste také úhel smykové roviny a zužuje se oblast PPD.

Z hlediska velikosti řezných sil (jejich minimalizace) je nejpříhodnější čtvercový průřez třísky a odebíraný objem materiálu třísky blízký kubickému. Nepříhodný průřez třísky (velká šířka a malá tloušťka) zvyšuje velikost normální složky řezné síly, jenž negativně ovlivňuje kvalitu povrchu a přesnost obrábění. Velikost normální složky řezné síly je nutné minimalizovat hlavně při dokončování dlouhými štíhlými nástroji.

3 Hodnocení kvality povrchu po obrábění

Integrita povrchu je jedním z největších problémů v současné strojírenské výrobě. Výsledkem obráběcích procesů je povrchová vrstva s rozdílnými vlastnostmi, než má obráběný materiál. Vlastnosti výsledné povrchové vrstvy jsou ovlivněny řadou faktorů, např. deformačními procesy, třením, teplotou, geometrií břitu, řeznými podmínkami apod.

Veškeré změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, můžeme shodně posuzovat jako změny jakosti. Posléze se mohou tyto změny dávat do souvislosti s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity.

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. [13]

Vývoj řezných materiálů umožňuje nasazení vysokých hodnot řezných podmínek, především řezných rychlostí. Toto velmi úzce souvisí i s výrobními náklady. Zvyšování řezných rychlostí má vliv na snižování strojních časů. Současně se ovšem zasahuje do integrity povrchu.

Obrábění vysokými řeznými rychlostmi mění množství vzniklého tepla a rovněž ovlivňuje obráběcí soustavy tímto teplem. Je nezbytné účinně odstraňovat třísky z pracovního prostoru stroje, z důvodu minimalizování tepelného ovlivnění. S tím souvisí i další trend technologie obrábění – přesné obrábění. Zvyšují se požadavky na přesnost povrchové vrstvy, ale i na vlastnosti povrchové vrstvy.

Zatím neexistuje způsob, kterým lze komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska její integrity. Řada údajů o obrobené ploše se sice již běžně zjišťuje, pro jiné jsou zpracovány postupy a navrhována potřebná zařízení. Zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je vlastní provoz. [13]

Integrita obrobeného povrchu je soubor vlastností obrobeného povrchu, popsany souborem následujících charakteristik: [7]

- topografie povrchu (geometrické charakteristiky profilu povrchu),
- strukturní změny v povrchové vrstvě,
- stupeň, hloubka a charakter zpevnění,
- smysl, velikost a průběh zbytkových napětí.

U HS obrábění dochází vlivem vysoké rychlosti k zúžení oblasti primární plastické deformace do úzkého pásu ve smykové rovině. Plastická deformace je velice malá a téměř nezasahuje pod rovinu řezu. Velikost zpevnění povrchové vrstvy tudíž závisí jen na terciální plastické deformaci. Uplatněním HS technologií se intenzita zpevnění povrchové vrstvy sníží a hloubka tohoto zpevnění je velmi malá.

Další výhoda vysokorychlostního obrábění je snížený podíl tepla přecházejícího do obrobku. Povrchová vrstva je méně tepelně namáhána a tím pádem nevzniká nepříznivé tahové pnutí na povrchu obrobku (vznik trhlin). Snížením teploty povrchu nedochází ani ke strukturním změnám v povrchových vrstvách. To je důležité zvláště u obrábění kalených materiálů, u kterých by vysoká teplota povrchu vyvolala popouštění a ztrátu tvrdosti.

Tvarová přesnost a drsnost obrobku je závislá rovněž na stabilitě procesu řezání. Pro dosažení stability musí být frekvence vynucených kmitů a samobuzeného kmitání rozdílná od vlastní frekvence některého určujícího členu systému. Nedochází tedy k rezonanci. Řezný proces v režimu HSC je stabilnější než řezný proces konvenčního obrábění z těchto důvodů:

- při frézování vysokými řeznými rychlostmi je frekvence vynucených kmitů (frekvence záběru jednotlivých břitů nástroje) mnohem vyšší, než vlastní frekvence členů soustavy S-N-O.

- frekvence samobuzeného kmitání (budící síla je vyvolána řezným procesem) je mnohem vyšší, než vlastní frekvence členů soustavy S-N-O. Frekvence budící síly u samobuzeného kmitání je závislá na tvorbě třísky. Při HSC vznikají převážně třísky soudržné, článkovité a elementární. Frekvence vzniku článků nebo elementů je velmi vysoká a proto je vysoká i frekvence budící síly. [5]

Důraz na topografii povrchu se klade u HSC obrábění zejména při dokončovacím obrábění. Na topografii povrchu ovšem nemá velký vliv samotná HS technologie, ale především řada faktorů, které se v procesu vyskytují. Především se jedná o statickou a dynamickou tuhost celého systému, skládajícího se z nástroje, stroje a obrobku.

3.1 Drsnost povrchu

Použitím jakékoli technologické metody vzniká na povrchu technických ploch nerovnost, která má velký význam na funkci těchto ploch. Jelikož povrch představuje prostorový útvar, problém posuzování nerovností se řeší redukcí do roviny řezu rovinu kolmou k povrchu. Tím se získá profil, který je základním zdrojem informací.

Skutečný profil povrchu je definovaný jako profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu (povrchu omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí) a dané roviny.

Zaznamenaný profil povrchu, je takový profil, který je nasnímán a zaznamenan jako skutečný profil povrchu měřicím hrotem. Přitom bude naměřená hodnota vlivem poloměru r_{tip} měřicího hrotu, popř. vlivem patky měřicího hrotu pro měření drsnosti povrchu ovlivňována principem snímání. Nedokonalosti povrchu podle ČSN EN ISO 8785 nesmí být zahrnuty do měření.

3.2 Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999)

Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$, v rozsahu základní délky.

Rmr(c) – materiálový poměr profilu (nosný podíl): Poměr (%) délky materiálu elementů profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce.

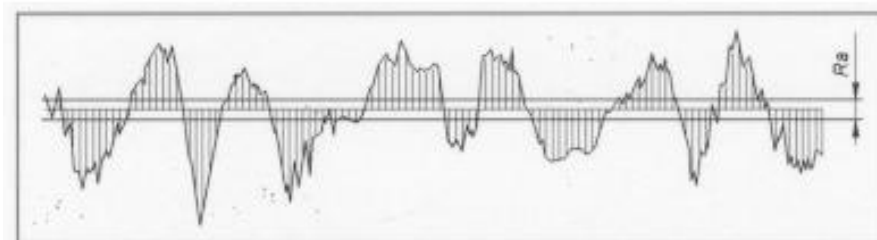
RSm – průměrná šířka prvků profilu: Aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky neboli určuje šířky prvků profilu v rozsahu základní délky. Jedná se o charakteristiku drsnosti v podélném směru povrchu.

Rt – celková výška profilu drsnosti: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocené délky l_n .

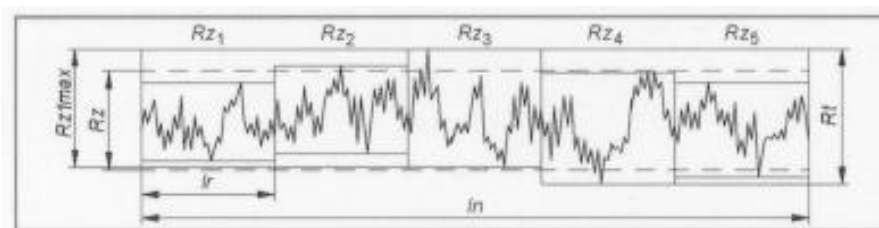
Rz_i – aritmetická hloubka profilu: Aritmetický průměr nejvyšších výšek profilu v jednotlivých základních délkách z vyhodnocované délky, standardně obsahující 5 základních délek.

Rz1max – maximální prohlubeň profilu drsnosti: Největších pět Rz_i hodnot z pěti základních délek l_{ri} uvnitř vyhodnocované délky l_n .

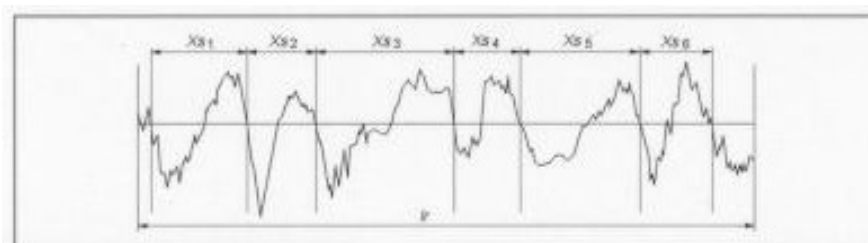
Rz – největší výška profilu: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 9 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [14]



Obr. 10 Celková výška profilu drsnosti Rt , největší výška profilu Rz a maximální prohlubeň profilu drsnosti Rz_{1max} . [14]



Obr. 11 Průměrná šířka prvků profilu RSm jako průměrná hodnota šířky Xs_i profilu součásti [14]

4 Návrh a provedení experimentu

Experiment je zaměřen na zkoumání integrity obrobeného povrchu při frézování rovinné plochy. Prvotním požadavkem na výrobu součásti je dosažení kvalitního povrchu, který je vytvořený v co nejkratším čase a rovněž co nejlevněji. Po uskutečnění experimentu lze prokázat, že zvýšení řezných rychlostí do oblasti vysokorychlostních znamená kvalitní povrch a rychlou výrobu.

Experimentální část práce byla provedena v laboratořích Institutu mechanické technologie v polské Poznani, za součinnosti s prof. Stanislawem Legutkem, DSc., PhD., MSc., Eng. Náplní experimentální části bylo hodnocení drsnosti povrchu v závislosti na navržených řezných parametrech a použitých řezných nástrojích.

Experiment byl proveden na stroji DMU 60 monoBLOCK od výrobce Deckel Maho s použitím tří různých nástrojů od firmy KENNAMETAL. Před vlastním testováním povrchu byl frézovaný materiál zarovnán konvenčním frézováním na výše uvedeném stroji.

Pro experiment bylo zvoleno sousledné frézování, jelikož tento způsob je nejvíce preferovaný a to z důvodu, že při jeho použití se očekávají nejlepší výsledky obrobených povrchů, orientace a velikost řezných sil, atd.

4.1 Obráběcí stroj

Při experimentu bylo použité univerzální 5 - osé CNC frézovací centrum DMU 60 MonoBlock s NC otočným stolem firmy Deckel Maho. Důležitým aspektem při výběru stroje byla možnost nastavení vysokých otáček vřetene, v rozsahu od 1 do 24 000 min^{-1} a nastavení pracovního posuvu až 24 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Mezi další přednosti tohoto stroje můžeme zahrnout vysokou tuhost, požadovanou přesnost a rovněž nabízí optimální ergonomii i uživatelskou přívětivost. Stroj je vybaven DGM řídícím panelem s 15" TFT obrazovkou a 3D softwarem. Řídícím systémem stroje je Heidenhain iTNC 530.



Obr. 12 Univerzální frézovací centrum DMU 60 monoBLOCK [21]

Tab. 1 Vybrané technické parametry stroje DMU 60 monoBLOCK® [22]

Počet řízených os:	5os
Pracovní rozsah X/Y/Z:	730 / 560 / 560 mm
Točivý moment:	130 Nm
Rozsah otáček vřetene:	1÷24 000 min ⁻¹
Upínací plocha stolu:	1000 x 600 mm
Pracovní posuv a rychloposuv:	24 / 24 / 24 m.min ⁻¹ (X/Y/Z)
Výkon motoru:	15 kW
Maximální hmotnost obrobku:	700 kg
Řídicí systém:	Heidenhain iTNC 530

Ustavení obrobku bylo provedeno pomocí obrobkové sondy OMP 60, u které byl použit optický systém OMI-2 instalující se do vřetene v obráběcím centru. Tato sonda od firmy Renishaw se používá v CNC obráběcích centrech nebo frézkách k ustavení a kontrole obrobků. Díky konstrukčnímu řešení jak sonda, tak i komunikační modul odolávají náročným podmínkám pracovního prostředí obráběcího stroje včetně nárazů a vibrací.

Tab. 2 Vybrané technické parametry sondy REINSHAW OMP60 [15]

Délka sondy:	76 mm
Průměr sondy:	63 mm
Typ přenosu signálu:	360° infračervený optický přenos
Pracovní dosah signálu:	až 6 m
Směry snímání:	vícesměrové: $\pm X$, $\pm Y$, $+Z$
Max. akcelerace:	150 m.s^{-2} s 50 mm dotekem
Krytí:	IPX8



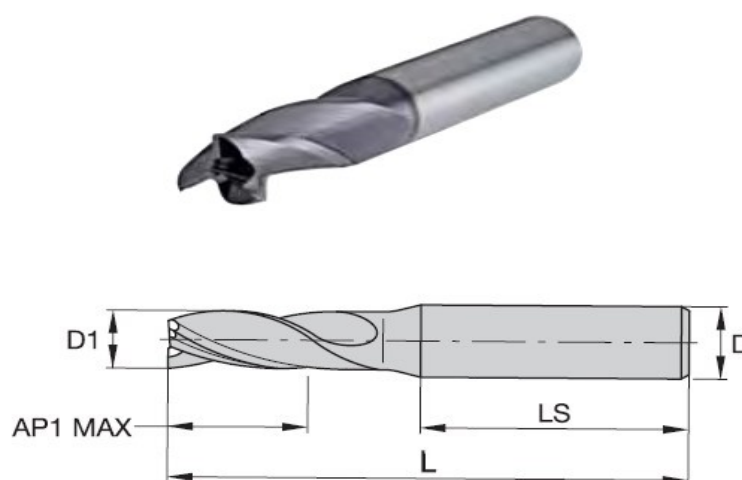
Obr. 13 Optická sonda OMP60/OMI-2 s modulovaným systémem přenosu [15]

4.2 Použité nástroje

Při provádění experimentu byly použité nástroje od firmy Kennametal. Tato společnost zaujímá jedno z předních míst mezi výrobci nástrojů. Nabízí vyčerpávající škálu nejmodernějších obráběcích nástrojů. Pro konkrétní podmínky experimentu byly vybrány nástroje: F3AH1600ADL30, F3AH1800ADL30 a F4AJ1800ADN30.

Nástroj č. 1 - F3AH1800ADL30

Tato karbidová tříbřitá stopková fréza se stoupáním šroubovice 30° je vhodná pro vysokoproduktivní obrábění díky tuhému tělesu a konstrukci s dostatečně velkou zubovou mezerou, jenž zaručuje bezproblémový odvod třísek i při vysokých rychlostech řezání. Tímto nástrojem lze provádět i dokončovací frézování.



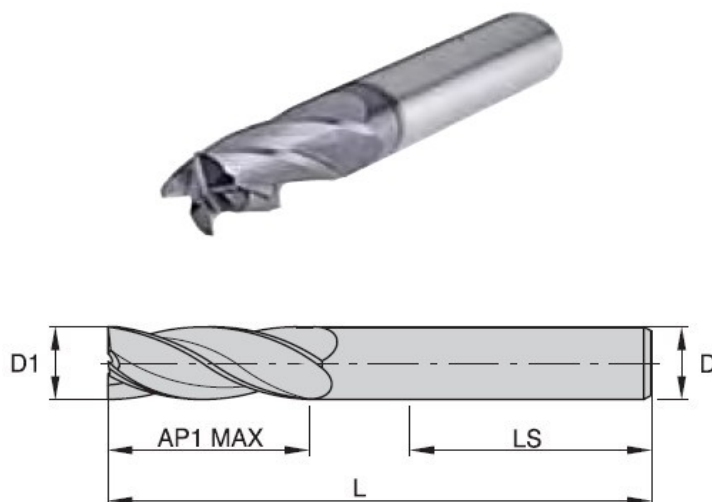
Obr. 14 Fréza F3AH1800ADL30 [16]

Tab. 3 Rozměry frézy F3AH1800ADL30 [16]

D1	D	Ap1 max	LS	L
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
18	18	26	48	92

Nástroj č. 2 - fréza F4AJ1800ADN30

Jedná se o karbidovou čtyřbřitou stopkovou frézu se stoupáním šroubovice 30° . Je vhodná pro vysokorychlostní obrábění. Bezproblémový odvod třísek je zaručen dostatečně velkou zubovou mezerou i při vysokých rychlostech řezání. Nástroj je také vhodný pro dokončovací obrábění.



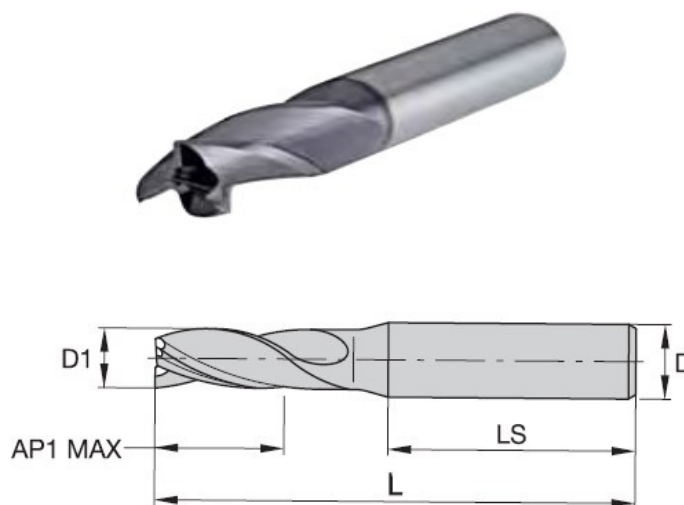
Obr. 15 Fréza F4AJ1800ADN30 [16]

Tab. 4 Rozměry frézy F4AJ1800ADN30 [16]

D1	D	Ap1 max	LS	L
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
18	18	32	48	92

Nástroj č. 3 – fréza F3AH1600ADL30

Fréza s uvedeným označením se liší od frézy F4AJ1800ADN30 pouze rozměry. Použití je totožné, jako u předchozí frézy.



Obr. 16 Fréza F3AH1600ADL30 [16]

Tab. 5 Rozměry frézy F3AH1600ADL30 [16]

D1	D	Ap1 max	LS	L
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
16	16	26	48	92

Způsob povlakování nástrojů

Obecně se při povlakování nástrojů používají dvě metody a to metoda CVC (Chemical Vapour Deposition) a metoda PVD (Physical Vapour Deposition). Pro tento konkrétní případ byla použita metoda PVD s vrstvami TiN, TiCN, TiC. Jako důvod lze uvést, že při použití povlaku TiN bývá dosaženo lepších výsledků z hlediska opotřebení břitu nástroje. Dalším důležitým faktorem je, aby při HSC obrábění celková tloušťka povlakované vrstvy nepřesáhla 10 μm , jelikož větší tloušťka zvětšuje zaoblení řezné hrany, což negativně ovlivňuje přesnost, drsnost a celkový řezný proces.



Obr. 17 Schematické zobrazení povlaku použitých fréz [16]

4.3 Obráběné materiály

Při provedení experimentu byly použité následující materiály:

- 12 050.1 (C45);
- 15 128 (13MoCrV6);
- ASP 2023.

Materiál 12 050.1 (C45)

Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení, ocel 12 050.1 normalizačně žíhaná (ČSN 41 2050). Používá se na hřídele těžebních strojů, turbokompresorů, rotory šroubových kompresorů, na větší ozubená kola, ozubené věnce, šneky, pístnice, ojnice, vřetena, písty kompresorů, čepy, šrouby a další.

Tab. 6 Chemické složení oceli 12 050.1 (C45)

Označení materiálu	12 050.1							
Chemické složení [%]	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
	0,42	0,50	0,17	max	max	max	max	max
	0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,40	0,40

Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1 (C45)

Mechanické vlastnosti	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A5$ [%]	Tvrdość HB [-]	E [GPa]
12 050.1	331	637	22,2	max. 225	211



Obr. 18 Materiál 12 050.1 po provedení experimentu

Materiál 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128

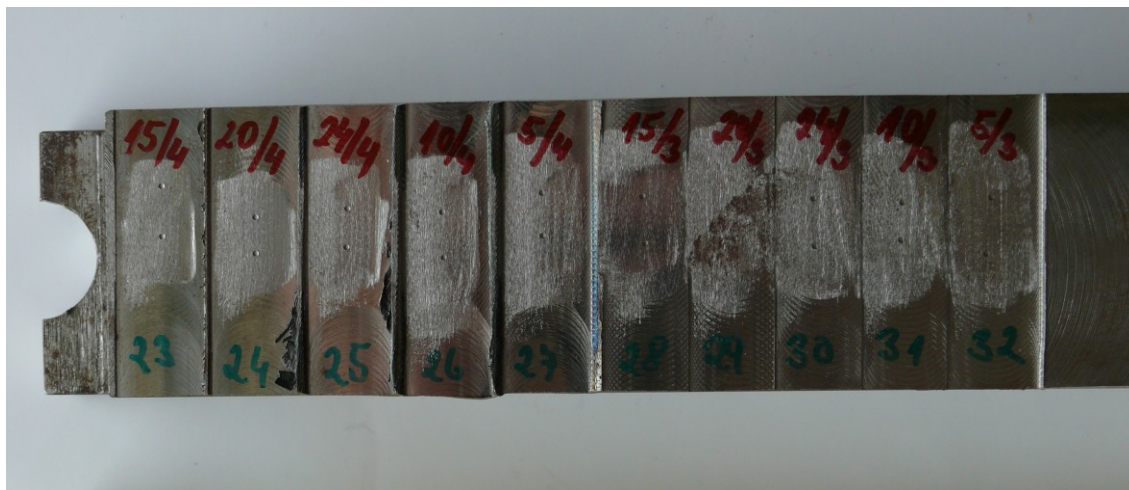
Ocel patří do kategorie nízkolegovaných svařitelných žárovevných ocelí. Materiál je charakteristický zvýšenou žárupevností, která je v teplotní oblasti 600°C. Použití materiálu je především na kotlové trubky.

Tab. 8 Chemické složení oceli 15 128 (13MoCrV6)

Označení materiálu	15 128							
Chemické složení [%]	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
	0,10	0,45	0,15	0,50	0,40	0,22	max	max
	0,18	0,70	0,40	0,75	0,60	0,35	0,040	0,040

Tab. 9 Mechanické vlastnosti oceli 15 128 (13MoCrV6)

Mechanické vlastnosti	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Tvrdość HB [-]	E [GPa]
15 128	294	470 - 640	17	135 - 183	214



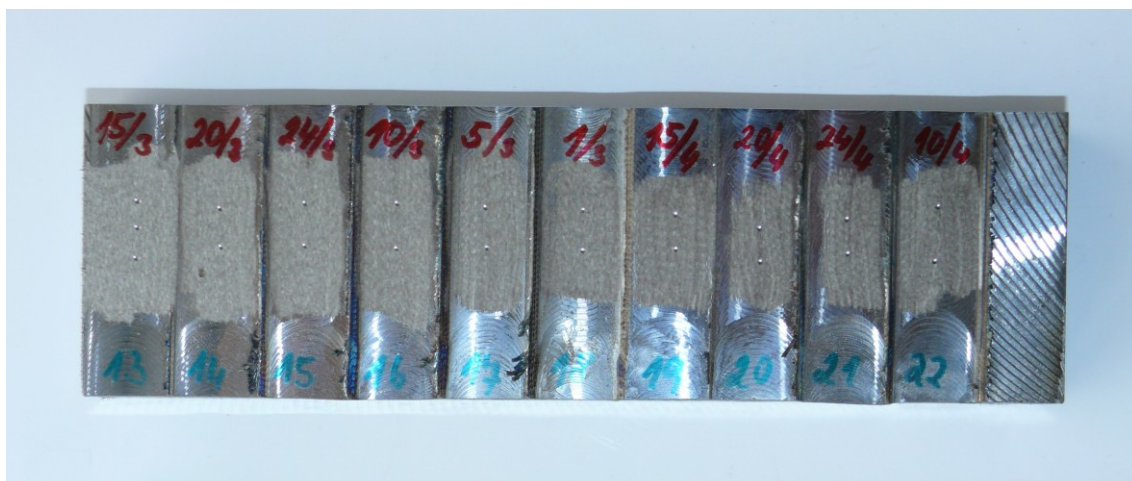
Obr. 19 Materiál 15 128 po provedení experimentu

Materiál ASP 2023

Nástrojová ocel ASP 2023 je bezkobaltová rychlořezná ocel, vyráběná metodou práškové metalurgie. Tato ocel je vhodná pro vysokovýkonné nástroje a pro práci za studena. Výrobce oceli je společnost Erasteel (Švédsko, Francie). Materiál byl dodán s tvrdostí 260 HRC.

Tab. 10 Chemické složení ASP 2023

Označení materiálu	ASP 2023				
Chemické složení [%]	C	Cr	Mo	W	V
	1,30	4,20	5,00	6,40	3,10



Obr. 20 Materiál ASP 2023 po provedení experimentu

4.4 Volba řezných parametrů

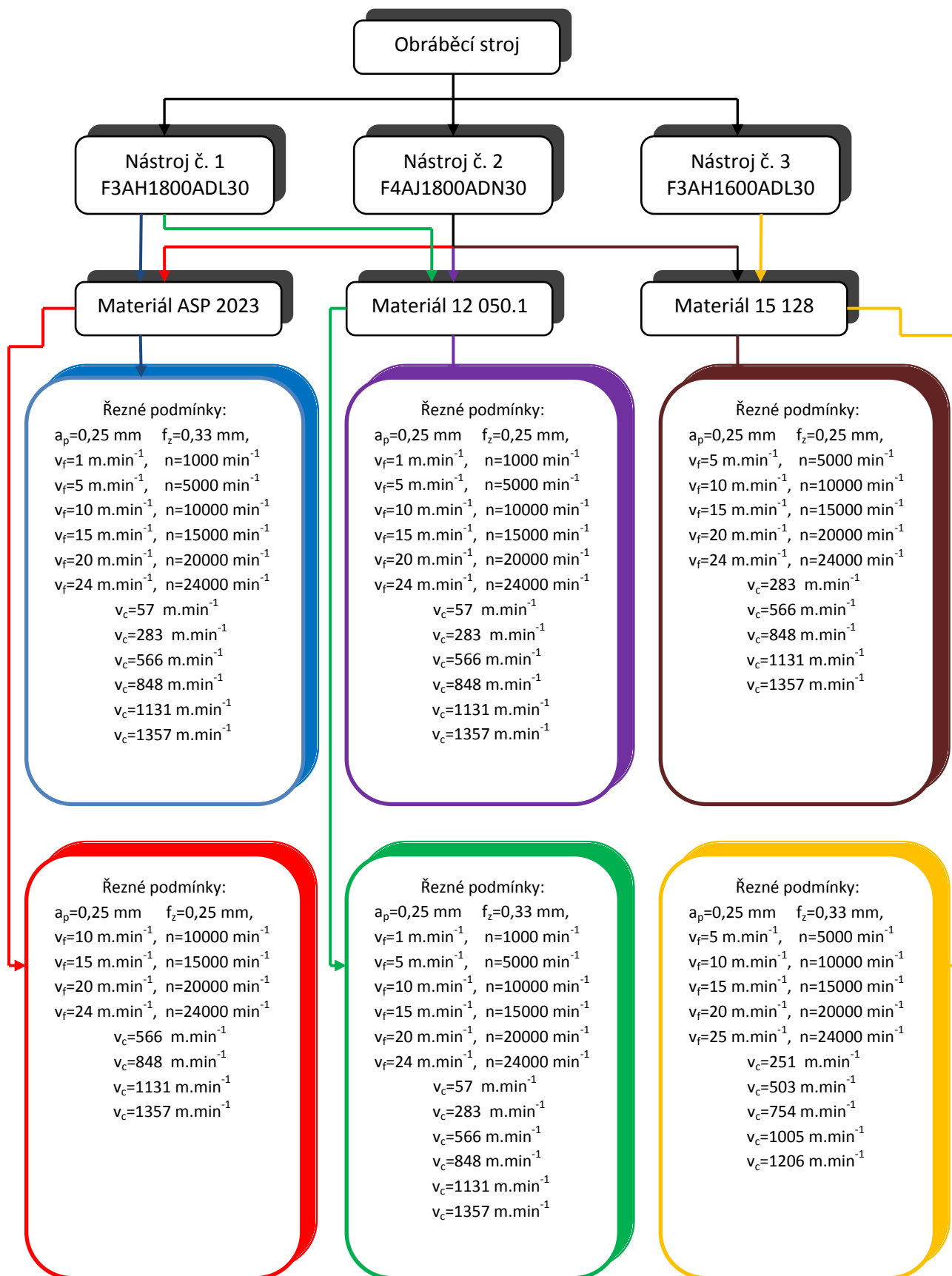
Drsnost povrchu závisí výrazně na velikosti posuvu a řezné rychlosti, geometrii bříty, velikosti fazetky u nástroje apod. Dosažitelná přesnost zaleží významně na tuhosti a přesnosti obráběcího stroje.

Pro experiment bylo zvoleno sousledné frézování a jednotlivé řezné parametry byly zvolené s ohledem na čtvercový úběr třísky. Velikosti řezných parametrů jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Příklad výpočtu řezné rychlosti v_c , při obrábění frézou F3AH1800ADL30, průměr frézy $D1 = 18 \text{ mm}$, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot 1000}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot 18 \cdot 1000}{1000} = 56,5 \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$



Obr. 21 Plán provedení experimentu

Experiment č. 1

Pro první experiment byla použita uhlíková ocel 12 050.1 a nástroj č. 2, fréza F4AJ1800ADN30. Hloubka řezu a posuv na zub byly zvoleny konstantní a měnily se parametry řezné rychlosti, otáček a posuvu, což je charakteristické pro všech šest experimentů.

Tab. 11 Řezné parametry prvního experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
1	1	1000	57	0,25	0,25
2	5	5 000	283		
3	10	10 000	566		
4	15	15 000	848		
5	20	20 000	1131		
6	24	24 000	1357		

Experiment č. 2

Druhý experiment byl rovněž proveden na materiálu 12 050.1, avšak zde byl použitý nástroj č. 1, a to fréza F3AH1800ADL30.

Tab. 12 Řezné parametry druhého experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
7	1	1000	57	0,25	0,33
8	5	5 000	283		
9	10	10 000	566		
10	15	15 000	848		
11	20	20 000	1131		
12	24	24 000	1357		

Experiment č. 3

U třetího experimentu byla použita nástrojová ocel s označením ASP 2023 a obráběcí nástroj č. 1 fréza F3AH1800ADL30.

Tab. 13 Řezné parametry třetího experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
18	1	1000	57	0,25	0,33
17	5	5 000	283		
16	10	10 000	566		
13	15	15 000	848		
14	20	20 000	1131		
15	24	24 000	1357		

Experiment č. 4

Zde byl rovněž použit materiál ASP 2023 a nástroj č. 2 F4AJ1800ADN30.

Tab. 14 Řezné parametry čtvrtého experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
22	10	10 000	566	0,25	0,25
19	15	15 000	848		
20	20	20 000	1131		
21	24	24 000	1357		

Experiment č. 5

Pátý experiment byl proveden na oceli 15 128, použitý byl nástroj č. 2 a to fréza s označením F4AJ1800ADN30.

Tab. 15 řezné parametry pátého experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
27	5	5 000	283	0,25	0,25
26	10	10 000	566		
23	15	15 000	848		
24	20	20 000	1131		
25	24	24 000	1357		

Experiment č. 6

V závěrečném experimentu byl použitý opět materiál 15 128 a obráběcí nástroj č. 3, fréza F3AH1600ADL30.

Tab. 16 Řezné parametry šestého experimentu

Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]
32	5	5 000	251	0,25	0,33
31	10	10 000	503		
28	15	15 000	754		
29	20	20 000	1005		
30	24	24 000	1206		

5 Měření charakteristik drsnosti povrchu

Při hodnocení drsnosti povrchu byly sledovány parametry R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky a R_z – největší výška profilu: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Každá obrobená plocha byla změřena desetkrát a to ve směru podélném – ve směru vektoru posuvu i příčném – kolmo na směr posuvu.

5.1 Použité zařízení pro měření drsnosti

Měření parametrů drsnosti povrchu bylo provedeno na dotykovém měřicím přístroji SurfTest SJ – 401 od společnosti MITUTOYO. Přístroj umožňuje vyhodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoho dalších parametrů. Zařízení je slučitelné jak se zabudovanou tiskárnou, tak i s počítačem, který k němu lze připojit. Výsledky se zobrazují digitálně nebo graficky na dotykovém displeji.



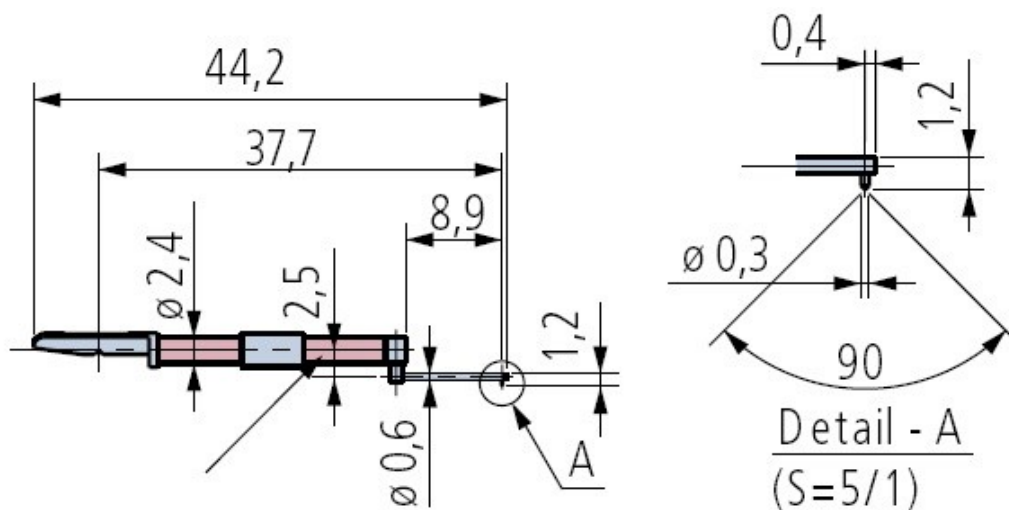
Obr. 22 Drsnoměr SurfTest SJ – 401 [20]

Tab. 17 Technické parametry drsnoměru [20]

Rozsah osy X (posuv):	25 mm
Rozsah osy Z (zdvih):	800 μm
Měřicí rychlost:	0,05; 0,1; 0,5; 1,0 mm.s^{-1}
Zpáteční rychlost:	0,5; 1,0; 2,0 mm.s^{-1}
Posuv (rozsah osy X):	25 mm (SJ-401) a 50 mm (SJ-402)
Zdvih (rozsah osy Z):	800 mm
Provozní teplota:	5 °C - 35 °C
Relativní vlhkost:	85 % relativní vlhkosti

Použitý snímací dotek

Pro měření byl použit snímací dotek s označením 12AAC733. Rádus hrotu snímače 2 μm , úhel špičky 60° a měřicí síla na hrot byla 4 mN.



Obr. 23 Snímací dotek 12AAC733 [20]

Pro měření byly zvoleny následující parametry:

- základní délka profilu (cut – off) $l_r = 0,8 \text{ mm}$,
- vyhodnocovaná délka profilu $l_n = 4 \text{ mm}$,
- rychlost snímání: $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$,
- použitý filtr: Gaussův.

5.2 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou

Hrubé chyby jsou způsobeny nepozorností již při měření, zápisu výsledků nebo při použití vadných přístrojů apod. Měření, zatížené hrubou chybou obvykle snadno poznáme podle toho, že se nenápadně liší od měření ostatních. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment, proto naměřené hodnoty, výrazně odlišné od ostatních hodnot se vyloučí. Postup testování odlehlé hodnoty je následující:

Výpočet průměrné hodnoty výběru z naměřených hodnot $x_1 < x_2 < \dots < x_n$:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Kde: \bar{x} průměrná hodnota výběru,
 x_i naměřené hodnoty veličiny,
 n počet měření.

a výběrové směrodatné odchylky $s(x)$:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Kde: $s(x)$ výběrová směrodatná odchylka,
 x_i naměřené hodnoty veličiny,
 x_i naměřené hodnoty veličiny,
 n počet měření.

Pro posouzení odlehlých hodnot souboru (x_6, x_n) se vypočítají normálové hodnoty H_6, H_n :

$$H_6 = \frac{x - x_6}{s(x)} \quad (4) \quad \text{popřípadě:} \quad H_6 = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (5)$$

Kde: H_6, H_n normálové hodnoty,
 $s(x)$ výběrová směrodatná odchylka,
 \bar{x} průměrná hodnota výběru,
 n počet měření.

Pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření n , se z tabulek určí mezní hodnota pro H . Mezní hodnota je pro pravděpodobnost $p = 95 \%$ a pro počet měření $n = 10$ rovna 2,18.

Rovněž se vychází z předpokladu, že $H_6 < H$ nebo $H_n < H$ potom x_6 není zatížena hrubou chybou a ponechá se v souboru, ovšem hodnota x_n je ovlivněna hrubou chybou a musí se ze souboru vyloučit.

5.3 Určování nejistot měření

Nejistota měření udává rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se netýká pouze výsledku měření, ale i měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých nejistota výsledku měření závisí. Podstatou určování nejistot měření je statistický přístup. Mírou nejistoty měření je směrodatná odchylka udávané veličiny. Takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní nejistota u , která se dělí na standardní nejistotu typu A a typu B.

Standardní nejistoty typu A - u_A

Jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují za obecně neznámé. Stanovují se z opakovaných měření a se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují.

$$u_{Ax} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

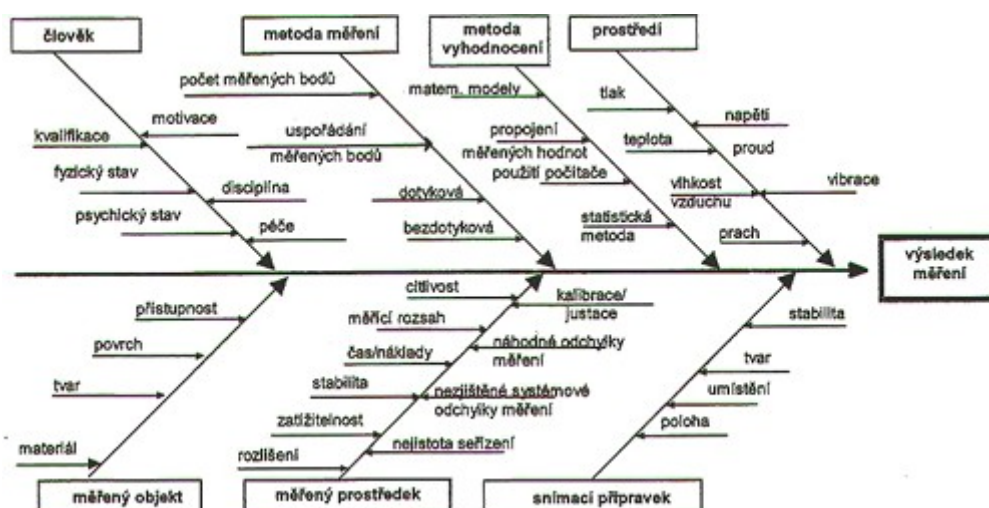
Standardní nejistota typu B – u_B

Tyto nejistoty jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor. Jejich určování nebývá vždy jednoduché a při zvýšeném požadavku na přesnost se musí provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti. Tyto nejistoty nezávisí na počtu měření.

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (7)$$

Vlivy, které přispívají k nejistotě typu B:

- prostředí měření (teplota, vlhkost, vibrace, částičky nečistot),
- měřený objekt (hodnota a typ odchylky tvaru, vlnitost, drsnost, materiál, rozměr, hmotnost),
- měřicí zařízení (osy zařízení, hmotnost, měřicí rozsah, systém na měření délky, snímací systém, software na měření a vyhodnocení),
- obsluha měřicího zařízení (upevnění, nastavení, konfigurace hrotu, použití přídatných zařízení, plánování, integrita, pořádek a čistota),
- strategie měření (metoda měření, počet a rozložení měřených bodů, filtr, kritérium hodnocení, typ náhradního prvku).



Obr. 24 Faktory ovlivňující výsledek měření [19]

Kombinovaná standardní nejistota u_c

Je sumací nejistot typu A a B. Hodnotí-li se výsledek měření touto nejistotou, není třeba rozlišovat nejistotu typu A a B. Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytnout skutečná hodnota měřené veličiny. V praxi se dává této nejistotě přednost.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (8)$$

Rozšířená standardní nejistota U

Udává se v případě, kdy je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Získá se tak, že se kombinovaná standardní nejistota u_c vynásobí součinitelem $k_u = 2$.

$$U = k_u \cdot u_c \quad (9)$$

5.4 Příklad výpočtu drsnosti s určením hrubé chyby a nejistoty měření

Příklad výpočtu je uveden pro experiment č. 4, ve kterém byla použita fréza F4AJ1800ADN30, obráběným materiálem byla ocel s označením ASP 2023 a řezné parametry měly následující hodnoty: rychlost posuvu 10 m.min⁻¹, otáčky 10 000 min⁻¹, hloubka řezu 0,25 mm, posuv na zub 0,25 mm a řezná rychlost 566 m.min⁻¹. Pro tento příklad byla zvolena vyhodnocení drsnosti Rz měřené ve směru posuvu nástroje.

Tab. 18 Naměřené hodnoty drsnosti Rz

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i [μm]	3,41	4,10	4,00	3,60	4,10	4,90	3,90	3,20	3,42	3,80

Výpočet průměrné hodnoty výběru:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} (3,41+4,10+4,00+3,60+4,10+4,90+3,90+3,20+3,42+3,80) \\ &= 3,84 \text{ } [\mu\text{m}]\end{aligned}$$

Kde: \bar{x} průměrná hodnota výběru,
 x_i naměřené hodnoty veličiny,
 n počet měření.

Za podezřelou hodnotu, kterou je potřeba testovat na hrubou chybu, byla vyhodnocena $x_6 = 4,9$ mm.

$$H_6 = \frac{x - x_6}{s(x)} = \frac{4,9 - 3,8}{0,49} = 2,16 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Z tabulek se určila mezní hodnota pro H , která je v tomto případě $H = 2,18$ a porovnáme ji s vypočtenou hodnotou H_6 . Z výsledku je patrné, že $H_6 < H$, tím pádem x_6 není zatíženo hrubou chybou a může se v souboru ponechat.

Pro každou plochu vzorku byla stanovena standardní nejistota typu A (u_A), nejistota typu B se zde neuvádí, jelikož na rozdíl od standardní nejistoty typu A se směrodatná odchylka výběrového průměru neurčuje výpočtem z opakovaných měření, ale určuje se jiným způsobem. Její určování nebývá vždy jednoduché a je ovlivněno mnoha různými faktory.

Výpočet standardní nejistoty typu A (u_A):

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{2,118}{10 \cdot (10-1)}} = 0,153 [\mu\text{m}]$$

kde: $s(\bar{x})$ směrodatná odchylka výběrového průměru,

x_i naměřené hodnoty veličiny,

\bar{x} průměrná hodnota výběru,

n počet měření.

Kombinovaná standardní nejistota typu (u_c):

$$u_c = u_A = 0,153 [\mu\text{m}]$$

Rozšířená kombinovaná nejistota U_C :

$$U_C = k_u \cdot u_c = 2 \cdot 0,153 = 0,306 [\mu\text{m}]$$

Výsledek měření se vyjádří:

$$R_z = (3,84 \pm 0,306) [\mu\text{m}]$$

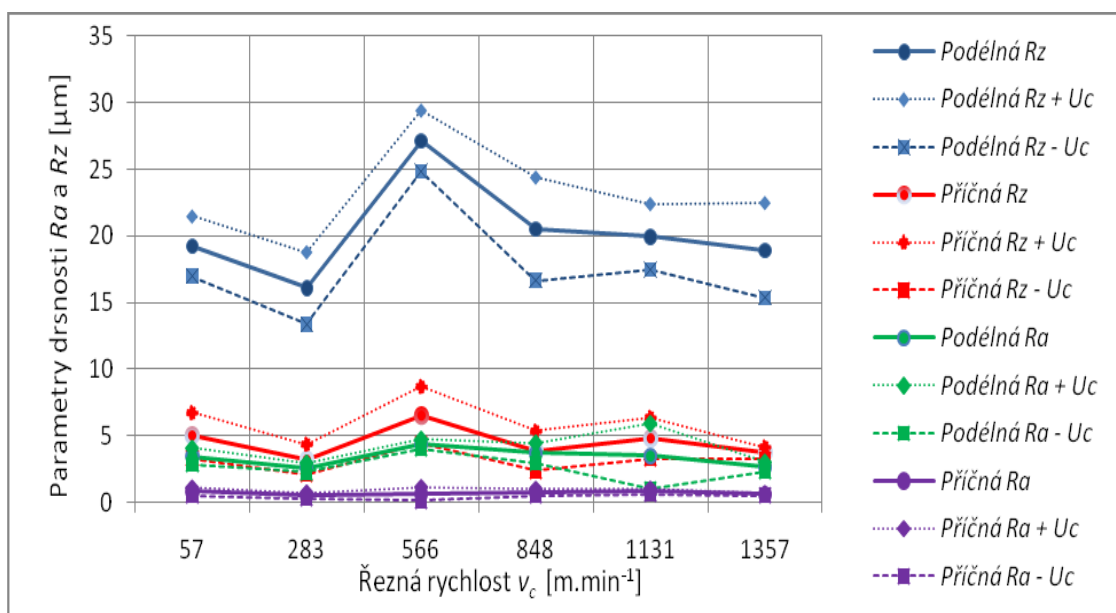
5.5 Zpracování naměřených hodnot

V grafech jsou zobrazeny průběhy drsností Ra a Rz v závislosti na řezné rychlosti jak ve směru vektoru posuvu, tak ve směru kolmém na směr vektoru posuvu. V tabulkách jsou spolu s vypočtenými hodnotami drsnosti povrchu uvedené i nejistoty měření. Každá z obrobených ploch je očíslována.

Experiment č. 1

Tab. 19 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Parametr drsnosti Rz		Parametr drsnosti Ra	
		Rz podélný směr [μm]	Rz příčný směr [μm]	Ra podélný směr [μm]	Ra příčný směr [μm]
1	57	19,22±2,25	5,02±1,72	3,45±0,62	0,82±0,30
2	283	16,08±2,71	3,22±1,16	2,61±0,34	0,51±0,22
3	566	27,12±2,28	6,54±2,15	4,39±0,36	0,64±0,52
4	848	20,52±3,87	3,86±1,50	3,72±0,75	0,75±0,27
5	1131	19,94±2,46	4,82±1,57	3,48±2,46	0,83±0,21
6	1357	18,92±3,56	3,72±0,45	2,65±0,36	0,60±0,08



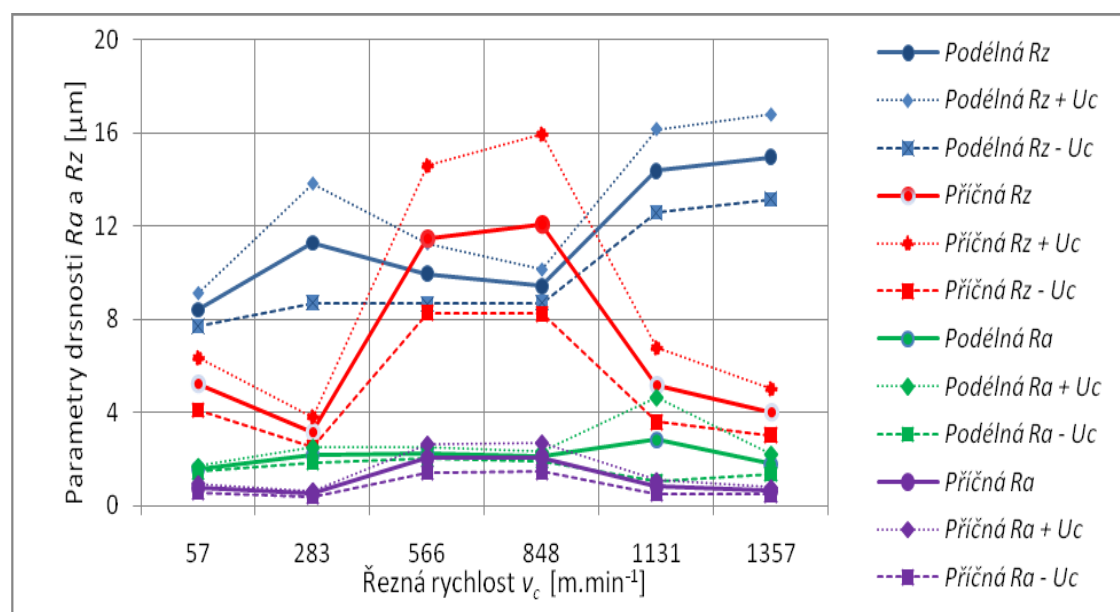
Obr. 25 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu 12 050.1 po obrábění čtyřbřitou frézou

Z grafického vyjádření vyplývá, že při řezné rychlosti 566 m.min^{-1} je dosaženo nejhorších parametrů drsnosti. Z této skutečnosti lze usoudit, že při obrábění materiálu 12050.1 čtyřzubou frézou byly zvolené parametry ($v_c = 566 \text{ m.min}^{-1}$, $n = 10\,000 \text{ min}^{-1}$, $v_f = 10 \text{ m.min}^{-1}$) nejméně vhodné. Naopak nejlepších výsledků je dosaženo při řezných rychlostech 283 m.min^{-1} a 1357 m.min^{-1} .

Experiment č. 2

Tab. 20 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	Parametr drsnosti Rz		Parametr drsnosti Ra	
		Rz podélný směr [μm]	Rz příčný směr [μm]	Ra podélný směr [μm]	Ra příčný směr [μm]
7	57	$8,42 \pm 0,71$	$5,22 \pm 1,12$	$1,58 \pm 0,12$	$0,76 \pm 0,20$
8	283	$11,26 \pm 2,56$	$3,16 \pm 0,65$	$2,19 \pm 0,32$	$0,51 \pm 0,14$
9	566	$9,96 \pm 1,30$	$11,43 \pm 3,15$	$2,26 \pm 0,25$	$2,04 \pm 0,62$
10	848	$9,42 \pm 0,72$	$12,08 \pm 3,85$	$2,11 \pm 0,21$	$2,08 \pm 0,63$
11	1131	$14,36 \pm 1,79$	$5,18 \pm 1,59$	$2,84 \pm 1,79$	$0,81 \pm 0,28$
12	1357	$14,96 \pm 1,81$	$4,02 \pm 0,99$	$3,06 \pm 0,43$	$0,63 \pm 0,15$



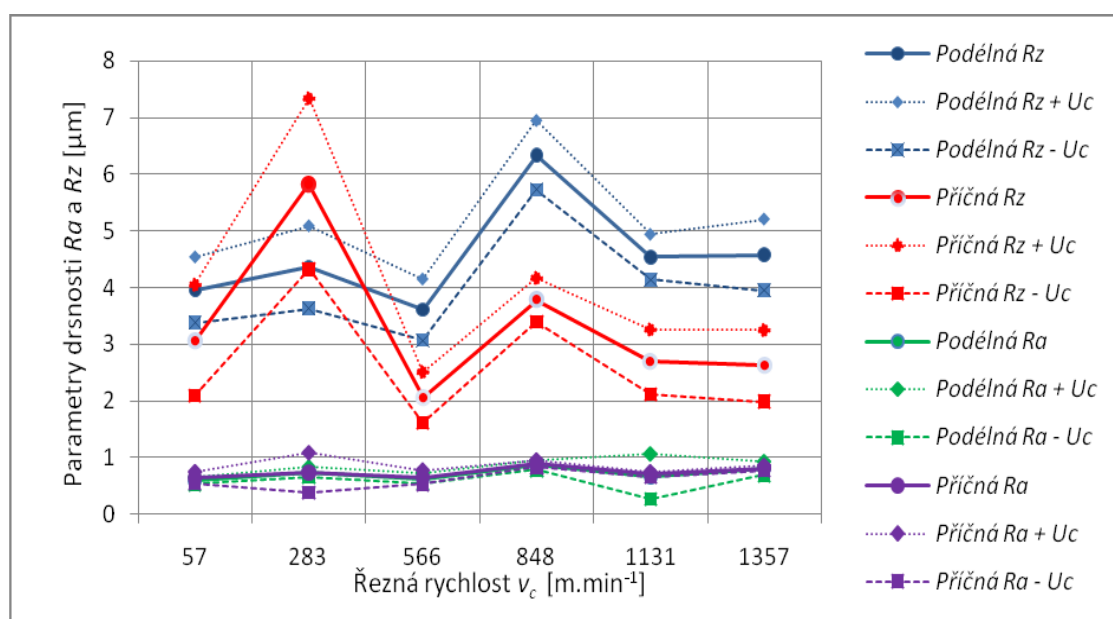
Obr. 26 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu 12 050.1 po obrábění tříbřitou frézou

Z grafického vyjádření pro druhý experiment je patrné, že při frézování materiálu 12 050.1 třízubým nástrojem se rozpětí drsnosti pohybuje v menším intervalu, než při frézování stejného materiálu čtyřzubou frézou. Nejlepších parametrů drsnosti je dosaženo při řezné rychlosti 57 m.min^{-1} .

Experiment č. 3

Tab. 21 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	Parametr drsnosti Rz		Parametr drsnosti Ra	
		Rz podélný směr [μm]	Rz příčný směr [μm]	Ra podélný směr [μm]	Ra příčný směr [μm]
18	57	$3,96 \pm 0,58$	$3,07 \pm 0,98$	$0,59 \pm 0,06$	$0,64 \pm 0,10$
17	283	$4,36 \pm 0,73$	$5,83 \pm 1,51$	$0,74 \pm 0,09$	$0,73 \pm 0,35$
16	566	$3,61 \pm 0,54$	$2,06 \pm 0,45$	$0,63 \pm 0,09$	$0,65 \pm 0,12$
13	848	$6,34 \pm 0,61$	$3,78 \pm 0,39$	$0,86 \pm 0,08$	$0,89 \pm 0,06$
14	1131	$4,54 \pm 0,40$	$2,69 \pm 0,57$	$0,67 \pm 0,40$	$0,70 \pm 0,04$
15	1357	$4,58 \pm 0,63$	$2,62 \pm 0,63$	$0,81 \pm 0,12$	$0,81 \pm 0,04$



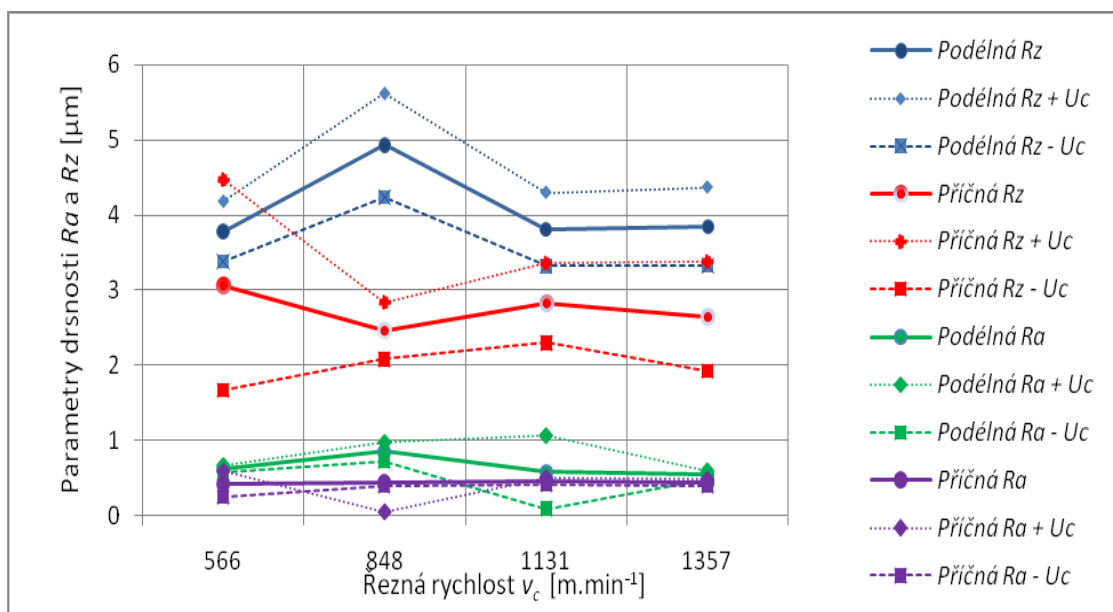
Obr. 27 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu ASP 2023 po obrábění tříbřitou frézou

Z grafického vyjádření plyne, že rozptyl drsnosti u materiálu ASP 2023 se pohybuje v menším intervalu, než u předchozí uhlíkové oceli 12 050.1. Dále je patrné, že při řezných rychlostech 283 m.min⁻¹ a 848 m.min⁻¹ je dosahováno nejhorších parametrů drsnosti. Naopak při vysokých řezných rychlostech, jako jsou hodnoty 1131 m.min⁻¹ a 1357 m.min⁻¹ je dosaženo příznivých parametrů drsnosti. Ovšem nejlepší drsnosti je dosaženo při řezné rychlosti 566 m.min⁻¹.

Experiment č. 4

Tab. 22 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Parametr drsnosti Rz		Parametr drsnosti Ra	
		Rz podélný směr [μm]	Rz příčný směr [μm]	Ra podélný směr [μm]	Ra příčný směr [μm]
22	566	3,84±0,31	3,07±1,40	0,62±0,05	0,42±0,17
19	848	4,93±0,69	2,46±0,38	0,85±0,13	0,44±0,05
20	1131	3,81±0,49	2,83±0,53	0,58±0,49	0,46±0,04
21	1357	3,85±0,52	2,65±0,73	0,54±0,06	0,44±0,04



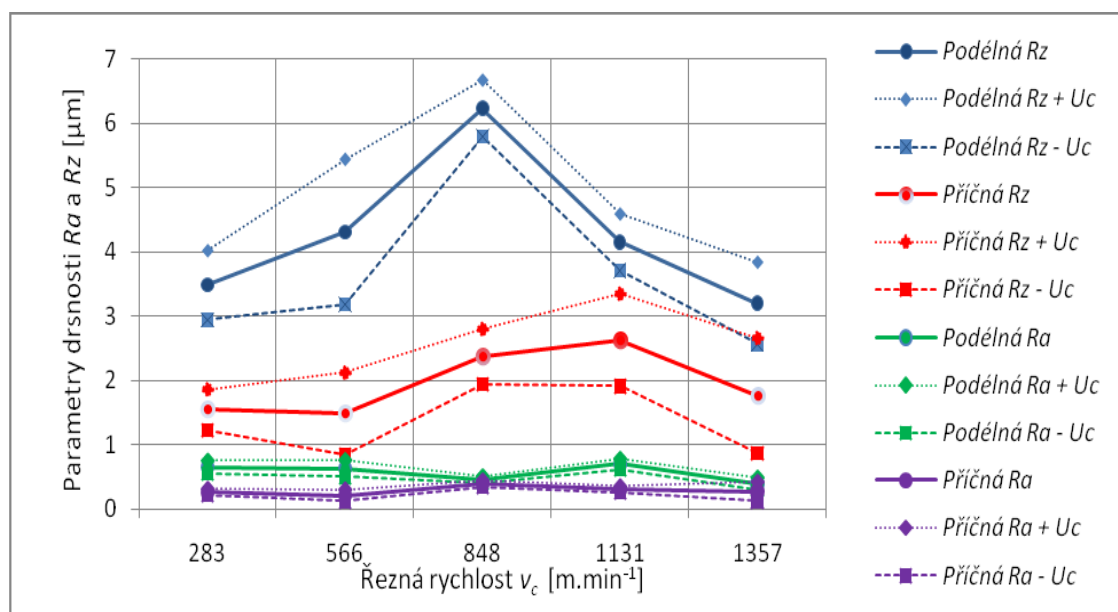
Obr. 28 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu ASP 2023 po obrábění čtyřbřitou frézou

Z grafu na obrázku 28 vyplývá, že při řezné rychlosti 848 m.min^{-1} je dosaženo nejhorších parametrů drsnosti, ovšem po překročení této rychlosti jsou parametry drsnosti výrazně příznivější.

Experiment č. 5

Tab. 23 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	Parametr drsnosti Rz		Parametr drsnosti Ra	
		Rz podélný směr [μm]	Rz příčný směr [μm]	Ra podélný směr [μm]	Ra příčný směr [μm]
27	283	$3,48 \pm 0,54$	$1,54 \pm 0,32$	$0,65 \pm 0,10$	$0,26 \pm 0,05$
26	566	$4,31 \pm 1,13$	$1,48 \pm 0,64$	$0,63 \pm 0,13$	$0,21 \pm 0,09$
23	848	$6,23 \pm 0,44$	$2,37 \pm 0,43$	$0,45 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,05$
24	1131	$4,15 \pm 0,44$	$2,63 \pm 0,72$	$0,70 \pm 0,08$	$0,30 \pm 0,05$
25	1357	$3,20 \pm 0,64$	$1,76 \pm 0,90$	$0,39 \pm 0,09$	$0,27 \pm 0,15$



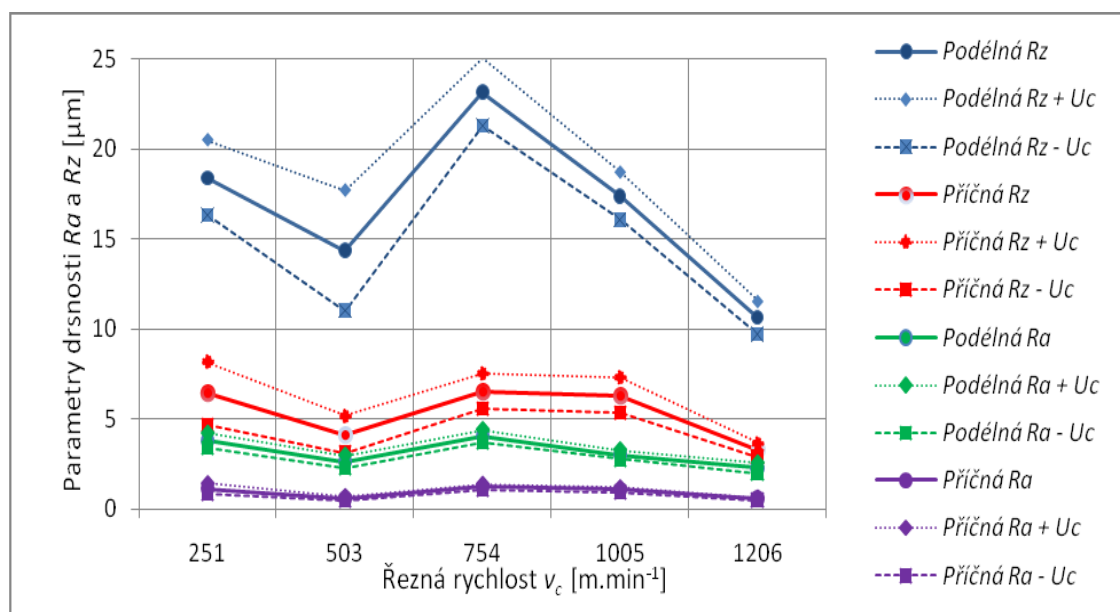
Obr. 29 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu 15 128 po obrábění čtyřbřitou frézou

V pátém experimentu byla obráběna ocel 15 128 čtyřzubou frézou. Z grafu je patrné, že při řezné rychlosti 848 m.min^{-1} bylo dosaženo nejhorších parametrů drsnosti. Naopak nejlepší hodnoty drsnosti byly zjistitelné při řezné rychlosti 283 m.min^{-1} .

Experiment č. 6

Tab. 23 Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	Parametr drsnosti R_z		Parametr drsnosti R_a	
		R_z podélný směr [μm]	R_z příčný směr [μm]	R_a podélný směr [μm]	R_a příčný směr [μm]
32	251	$18,40 \pm 2,09$	$6,41 \pm 1,74$	$3,79 \pm 0,40$	$1,12 \pm 0,30$
31	503	$14,36 \pm 3,35$	$4,14 \pm 1,02$	$2,62 \pm 0,35$	$0,58 \pm 0,13$
28	754	$23,15 \pm 1,88$	$6,54 \pm 0,96$	$4,05 \pm 0,34$	$1,23 \pm 0,16$
29	1005	$17,38 \pm 1,32$	$6,32 \pm 0,97$	$3,01 \pm 0,26$	$1,07 \pm 0,13$
30	1206	$10,63 \pm 0,92$	$3,28 \pm 0,38$	$2,27 \pm 0,28$	$0,56 \pm 0,08$



Obr. 30 Grafické vyjádření závislosti drsnosti povrchu na řezné rychlosti u vzorku materiálu 15 128 po obrábění třízubou frézou

Z grafického vyjádření vyplývá, že se při frézování třízubou frézou materiálu 15128 rozpětí drsnosti pohybuje v menším intervalu, než při obrábění stejného materiálu čtyřzubým nástrojem. Nejhorší parametry drsnosti jsou dosaženy při řezné rychlosti 754 m.min^{-1} . Na druhou stranu nejlepší hodnoty drsnosti jsou viditelné při řezných rychlostech 503 m.min^{-1} a 1206 m.min^{-1} .

5.6 Shrnutí dosažených výsledků drsnosti povrchu

Experiment měl potvrdit vliv vysokorychlostního obrábění na kvalitu obrobené plochy. Měření se provádělo v podélném směru, tj. v rovnoběžném směru se směrem posuvu frézy a v příčném směru, který je kolmý na směr posuvu nástroje. Byly měřeny parametry drsnosti R_a , R_z , a to $10\times$ a poté se z těchto hodnot vypočítala průměrná hodnota výběru a směrodatná odchylka. Nakonec byla spočítána kombinovaná standardní nejistota typu C a přiřazena k výsledku.

Z dosažených grafických výsledků je patrné, že od řezné rychlosti 848 m.min^{-1} se snižuje hodnota parametru drsnosti, tím pádem dosahuje obrobený povrch lepší kvalitu. Tento poznatek je zřetelný zejména u materiálu ASP 2023 a částečně i u materiálů 12 050.1 a 15 128.

Při porovnání obrobených materiálů je zjevné, že nejlepší parametry drsnosti se dosahují při obrábění materiálu ASP 2023, a to čtyřbřitým nástrojem, ovšem i tříbřitou frézou jsou dosaženy velmi příznivé hodnoty drsnosti. Naopak nejhorší parametry drsnosti dosáhla uhlíková ocel 12 050.1, která měla při obrábění oběma nástroji hodnoty drsnosti v porovnání s ostatními materiály nejhorší. U materiálu 15 128, obráběného čtyřzubým nástrojem byly zaznamenány pozitivní hodnoty drsnosti, kdežto při obrábění tříbřitým nástrojem byly parametry drsnosti podstatně horší.

Závěr

Podmínkou ekonomického využití moderní výrobní techniky je zejména intenzifikace řezného procesu. Jde především o použití kvalitativně vyšších řezných podmínek, především řezných rychlostí, které vedou ke zvýšení intenzity úběru obráběného materiálu. Takové podmínky splňuje vysokorychlostní obrábění. Tato technologie nepřináší pouze zvyšování produktivity ve smyslu zkracování času, ale také zvyšuje přesnost a kvalitu obrobené plochy. Zlepšování integrity povrchu způsobuje stabilizace řezného procesu v režimu HSC.

Diplomová práce se zabývala vlivem řezných parametrů na integritu povrchu při obrábění vysokými řeznými rychlostmi. V teoretické části práce byla srovnána problematika konvenčního a vysokorychlostního obrábění, vznik třísky v procesu konvenčním i HSC a rovněž vliv řezných podmínek při procesu tvoření třísky v režimu HSC. Závěr teoretické části patří definici integrity povrchu a způsoby, jak jí ovlivňují řezné parametry při obrábění.

Experimentální část se věnovala charakteristice stroje, nástrojů, materiálů, které byly v tomto experimentu použity, dále rovněž návrhem řezných parametrů. Měřené parametry drsnosti R_a a R_z byly vyneseny do grafů a to v závislosti na řezné rychlosti. V závěru práce bylo provedeno vyhodnocení a shrnutí dosažených výsledků.

Obecně se dá říci, že experiment potvrdil výhody použití HSC technologie, mezi které patří zkrácení strojního času, pozitivní vliv této technologie na integritu obrobené plochy a také energetické úspory.

Použitá literatura

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007, s. 151. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterskou formu studia*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003, s. 138.
- [4] ZELENÝ, J.; *Vysokorychlostní obrábění. MM průmyslové spektrum*. 2000. ISSN 1212-2572.
- [5] SKOPEČEK, T.; VODIČKA, J. *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005, s. 134. ISBN 80-7343-344-2.
- [6] ERDL, BERT, P. *High-speed machining*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineering, 2003. s. 250. ISBN 0-87263-649-6.
- [7] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-1.
- [8] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. Žilina: EDIS Žilina, 2007. S. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [9] Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění. *MM Průmyslové spektrum*, 2002, č. 12, s. 98, ISSN 1212-2572.
- [10] Ekologické a technické aspekty HSC obrábění. *MM Průmyslové spektrum*, 2001, č. 6, s. 72, ISSN 1212-2572.
- [11] MÁDL, J. Integrita povrchu po obrábění [online]. [cit. 2011-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-05-07.pdf>>.

[12] Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění: *MM Průmyslové spektrum*, 2003, č. 4, s. 94, ISSN 1212-2572.

[13] BUMBÁLEK, B. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. [online]. [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW:<http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>.

[14] Mitutoyo Česko s.r.o., Teplice, Česká republika. Měření drsnosti povrchu [online]. [cit. 2011-04-28]. Dostupný z WWW:<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/poster_drsnosti_ra_cze_a3.pdf>.

[15] Renishaw s.r.o., Brno, Česká republika. The OMI optical machine interface [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW:<<http://www.renishaw.com/en/omp60-touch-probe--6101>>.

[16] Kennametal Europe GmbH, Neuhausen am Rheinfall, Švýcarsko. Milling Tool Catalog 6050 – metric [online]. 2006 [cit. 2011-05-02]. s. 580. Dostupný z WWW:<http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/milling_metric_finalr.pdf>.

[17] FS TUL v Liberci, Studentská, Liberec. Řezné podmínky při obrábění [online]. [cit. 2011-04-27]. Dostupný z WWW:<http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf>.

[18] FS ČVUT Praha, Technická, Praha. Nejistoty měření [online]. [cit. 2011-04-27]. Dostupný z WWW:<<http://www.fsid.cvut.cz/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>>.

[19] Diagram příčin a následků [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW:<<http://www.designtech.cz/c/caq/diagram-pricin-nasledku.htm>>.

[20] Mitutoyo Česko s.r.o., Teplice, Česká republika. Drsnoměry měření jakosti povrchu [online]. [cit. 2011-05-13]. Dostupný z WWW:<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/06_drsnomery.pdf>.

[21] Technotools OHG, Haferwende, Germany. DMU 60 monoBLOCK® [online]. [cit. 2011-05-13]. Dostupný z WWW:<http://www.technotools.de/assets/images/DMU_60_monoBlock.gif>.

[22] Gildemeister Aktiengesellschaft, Bielefeld, Germany. DMU 60 monoBLOCK®/
Highly dynamic, for the shortest cycle times at the highest quality [online]. [cit. 2011-05-13].
Dostupný z WWW:<
<http://www.dmgczech.com/en,milling,dmu60monoBLOCKnd?opendocument>>.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval své vedoucí diplomové práce paní Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D., za její cenné připomínky, ochotu a vedení mé diplomové práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině, která mě během studia jak morálně, tak materiálně podporovala.